

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

CARLOS HENRIQUE PARREIRA DE ARAÚJO

COMPRESSIBILIDADE DE MISTURAS DE UM SOLO ARGILOSO
COM RESÍDUO DE VIDRO

Uberlândia
Janeiro 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

CARLOS HENRIQUE PARREIRA DE ARAÚJO

COMPRESSIBILIDADE DE MISTURAS DE UM SOLO ARGILOSO
COM RESÍDUO DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito
para obtenção de diploma no curso de Engenharia
Civil pela Universidade Federal de Uberlândia

Orientadora: Prof^ª. Dra. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia
Janeiro 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Silvia e Luiz, que sempre me apoiaram desde os meus primeiros passos na jornada acadêmica, e por terem me ensinado o devido valor do conhecimento na vida do ser humano. De fato, são os únicos que, sem eles, nada disso seria possível, pois o maior e excepcional dom de todos, à vida, me foi concebido por eles.

Agradeço também a minha melhor amiga e namorada, Luana, que desde o primeiro momento que nos conhecemos me incentivou e me acolheu em todos os momentos de dificuldades e incertezas, e durante os estudos e noites em claro, ficou ao meu lado sem protestar.

Grato também aos colegas de turma e demais cursos, que foram o ponto chave de socialização para que os obstáculos fossem superados juntos. E, aos meus amigos: Alex Alves, Dayanne Castro, Diego Montalvão, Emanuel Martins, Gustavo Bernardes, Marcos Justino, Pedro Moura e Rodrigo Lino; que desde o primeiro dia de aula estiveram ao meu lado aprendendo e me ajudando em cada aula e disciplina.

À Universidade Federal de Uberlândia e todo seu corpo docente, direção e administração, por proporcionar um ambiente agradável e justo para concluir esta jornada.

À minha orientadora, Giovana Bizão Georgetti, que pôde me aconselhar certamente na conclusão deste.

E, principalmente, ao meu avô, José Gonzaga, que infelizmente não está mais entre nós para poder presenciar este grande marco em minha vida, mas tenho certeza de que estaria muito orgulhoso de seu querido neto.

RESUMO

No Brasil, os resíduos sólidos são um dos principais problemas de planejamento urbano e gestão pública do país. São produzidos diariamente cerca de 160 mil toneladas de resíduos sólidos, dos quais 2,34% são vidro, e, apesar de termos potencial de reciclar até 40% de todo material que é gerado, apenas 13% recebem tratamento adequado. Pesquisas apontam para a viabilidade de aplicação deste resíduo em materiais cimentícios e misturas com solos. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento sobre propriedades geotécnicas de misturas de resíduos de vidro em solos por meio da análise de ensaios de laboratório. Foram estudadas duas diferentes proporções em massa de mistura de resíduo de vidro e um solo argiloso laterítico, sendo elas 5% e 10%. Ensaio edométrico duplo foram realizados tanto com as misturas quanto com o solo virgem para avaliação da compressibilidade. Ensaio de papel filtro foi realizado para a mistura de 10% a fim de auxiliar a interpretação dos resultados. Para uma avaliação mais completa das características das misturas, foram utilizados resultados de pesquisas anteriores, sendo eles: curva granulométrica, massa específica dos grãos, limites de consistência, compactação, e curva de retenção de água do solo. Notou-se nos resultados que a presença de 5 e 10% de adição de resíduo ao solo praticamente não afetou os resultados de compactação, curva de retenção de água e a compressibilidade do solo, embora resultados da literatura mostrem aumento da resistência de misturas solo-resíduo de vidro.

Palavras-chave: Solo compactado, resíduo da indústria de vidro, compressibilidade, sucção.

ABSTRACT

In Brazil, solid waste is one of the main problems of urban planning and public management in the country. About 160,000 tons of solid waste are produced daily, of which 2.34% are glass, and although we have the potential to recycle up to 40% of all material that is generated, only 13% receive right treatment. Research points to the feasibility of applying this residue in cementitious materials and mixtures with soils. Likewise, this work aims to contribute to the knowledge about geotechnical properties of mixtures of glass waste in soils through the analysis of laboratory tests. Two different proportions by mass of the mixture of glass waste and a lateritic clayey soil were studied, namely 5% and 10%. Double edometric tests were carried out both with the mixtures and with the virgin soil to evaluate the compressibility. Filter paper test was performed for the 10% mixture in order to aid the interpretation of the results. For a more complete evaluation of the characteristics of the mixtures, results from previous research were used, namely: granulometric curve, grain specific mass, consistency limits, compaction, and soil water retention curve. It was noted in the results that the presence of 5 and 10% of residue addition to the soil practically did not affect the results of compaction, water retention curve and soil compressibility, although results from the literature show an increase in the resistance of soil-soil mixtures glass residue.

Keywords: Compacted soil, waste from the glass industry, compressibility, suction.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Resíduo de vidro como coletado..... | 11 |
| Figura 2 - Curvas granulométricas. | 12 |
| Figura 3 - Curvas de compactação e saturação 100%. | 14 |
| Figura 4 - Curvas de calibração para o papel filtro Whatman N° 42..... | 15 |
| Figura 5 - Corpo de prova compactado para cravação em anel..... | 16 |
| Figura 6 - Corpos de prova submetidos a ação da capilaridade por pedra porosa. | 16 |
| Figura 7 - Curva de retenção típica de um solo coesivo com as indicações das variáveis envolvidas..... | 18 |
| Figura 8 - Ensaio edométrico duplo em andamento (Fase de carregamento). | 19 |
| Figura 9 - Curva de retenção de água. | 21 |
| Figura 10 - Ensaios edométricos com solo virgem. | 23 |
| Figura 11 - Ensaios edométricos com mistura solo + 5% de resíduo. | 23 |
| Figura 12 - Ensaios edométricos com mistura solo + 10% de resíduo. | 24 |
| Figura 13 – Variação do índice de compressão nos ensaios edométricos. | 24 |
| Figura 14 - Variação do índice de recompressão nos ensaios edométricos..... | 25 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Porcentagens das frações granulométricas. | 13 |
| Tabela 2 - Limites de consistência, massa específica dos grãos e classificação unificada. | 13 |
| Tabela 3 - Pontos ótimos de compactação..... | 14 |
| Tabela 4 - Índices físicos médios dos corpos de prova. | 20 |
| Tabela 5 - Parâmetros de ajuste..... | 22 |
| Tabela 6 - Índices físicos corpos de prova para ensaio edométrico duplo. | 22 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO | 9 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 11 |
| 2.1. Produção, coleta e preparação do resíduo de vidro | 11 |
| 2.2. Coleta e preparação do solo | 12 |
| 2.3. Misturas de solo e resíduo..... | 12 |
| 2.4. Ensaio de caracterização e compactação | 12 |
| 2.5. Ensaio de papel filtro..... | 14 |
| 2.6. Ensaio de compressão edométrica | 18 |
| 3. RESULTADOS | 20 |
| 3.1. Ensaio de papel filtro..... | 20 |
| 3.2. Ensaio de compressão edométrico duplo | 22 |
| 4. CONCLUSÕES | 26 |
| REFERÊNCIAS..... | 27 |

1. INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

Os solos compactados usados em engenharia são frequentemente encontrados em condição não saturada ao longo da vida útil da obra. Estes estão sujeitos ao efeito de mudanças climáticas que alteram seu grau de saturação e por conseguinte, seu volume, seja no sentido de expansão e contração ou colapso. Tais alterações impactam a estabilidade da estrutura de projeto, principalmente na resistência ao cisalhamento e instabilidade volumétrica. (AGNELLI; ALBIERO, 1997)

No caso de solos argilosos, quando há umedecimento sob carga, ocorre uma tendência de quebra das partículas ou expansão (PEREIRA, 2013).

O ensaio edométrico é um método de laboratório que permite a análise de deformações em solos. Um modo de empregar este método realizando um ensaio simples com corpo de prova em umidade natural e ensaiado convencionalmente até tensão desejada, e então saturado para observar suas novas deformações.

Outro modo é o ensaio duplo, que apesar de semelhante ao ensaio simples, difere na comparação de corpos de prova em condição natural e saturado, tendo sua previsão de recalques calculadas pela teoria de adensamento.

Ensaio edométrico foram usados por Souto Silveira e Silveira (1963), Aflitos et al. (1990) e Rodrigues, Souza e Lollo (2002) e seus trabalhos evidenciam um aumento na capacidade de recebimento de carga e redução de recalque dos solos após compactação.

Outro fator que influencia na resistência e deformabilidade do solo é a sucção desenvolvida na água intersticial. Roque (2017) observou que ao aumentar o teor de areia em solos seu comportamento passa a ser menos dependente da sucção e índice de vazios e mais dependente da natureza do contato dos grãos. Nesse mesmo estudo, o autor notou que a sucção aumenta a resistência do solo e estabiliza-se após determinado teor de areia, e em alguns casos de baixos teores propiciou-se queda nos valores de resistência.

Na pesquisa de Chagas et al. (2019) que possui foco na melhoria do solo após a compactação, foram utilizadas amostras indeformadas em ensaio edométrico duplo para uma avaliação de possível colapso no solo. Juntamente com ensaios de prova de carga direta é observado queda no índice de vazios nos corpos de prova inundados submetidos a carregamento confirmando suspeitas de solo colapsível através da análise de curvas de carga x recalque, além disso, a compactação mostrou-se eficaz para reduzir o potencial de colapso do solo.

No aspecto de melhoria de solos algumas alternativas sustentáveis têm sido estudadas. Quintilha (2008) e Ferreira (2011), por exemplo, verificaram propriedades geotécnicas de resíduo de construção e demolição (RCD) visando aplicação em pavimentação e reforço para fundações, respectivamente. Consoli et al (2019), utilizou uma mistura com vidro doméstico, industrial, cinzas de carvão e carboneto de cal, a fim de gerar reações pozolânicas e material de preenchimento para estabilizar bases de pavimentos.

Benny et al. (2017) e Bilgen (2020) investigaram propriedades geotécnicas de resíduos da indústria de vidro em misturas com solo a fim de melhorar sua resistência de cisalhamento quando submetidos a variações de umidade ou impactos físicos, obtendo assim um solo mais estabilizado. A mistura traz uma redução dos limites de liquidez e plasticidade, além do aumento do Índice de Suporte Califórnia (ISC). Blayi et al. (2020) estimaram que a porcentagem ótima de adição se encontra entre 5% e 15%, sendo que acima deste intervalo, as propriedades da mistura tendem a piorar.

O resíduo da indústria do vidro é objeto deste estudo, é classificado como um resíduo de classe II-B pela NBR 10004 (ABNT, 2004), pois quando submetidos a contato dinâmico e estático com água, seus constituintes não são solubilizados e não afetam os padrões de potabilidade da água. Por conta disso, o vidro pode ser reutilizado quase que infinitamente, porém, isso também significa que quando direcionado para aterro, o resíduo de vidro necessitará de um longo período para decomposição.

No Brasil, os resíduos sólidos são um dos problemas de planejamento urbano e gestão pública. São produzidos diariamente cerca de 160 mil toneladas de resíduos sólidos, dos quais 2,34% são vidro, e, apesar de termos potencial de reciclar até 40% de todo material que é gerado, apenas 13% recebem tratamento adequado. (IPEA, 2021)

Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo contribuir para o conhecimento sobre propriedades geotécnicas das misturas de resíduos de vidro em solos por meio da análise de parâmetros de compressibilidade. Para isso, ensaios edométricos foram realizados em misturas com 5% e 10% de adição em solo argiloso inundado e na umidade de compactação. Os resultados foram comparados com o solo virgem. Os efeitos da sucção no comportamento da mistura foram verificados com auxílio da curva de retenção de água, obtida experimentalmente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção, coleta e preparação do resíduo de vidro

Os acabamentos das peças de vidro são feitos através de polimento principalmente nas extremidades, que possuem aspecto cortante. Do polimento é então gerado o resíduo de vidro, que é fornecido no estado de pasta. O material usado nessa pesquisa foi coletado na empresa Vitral, localizada na cidade de Uberlândia – MG.

O polimento consiste na utilização de brocas diamantadas que lapidam os pontos de interesse de cada peça de vidro, o que causa uma elevação de sua temperatura podendo causar trincas e invalidando o comércio da mesma. Em seguida, o resíduo é transportado por suspensão na água para tanques de passagem e por fim para estações de tratamento pertencentes a própria empresa. Com utilização de floculantes e neutralizados de pH, o resíduo é separado da água e armazenado em bolsões (bags), que também possui um papel de filtragem no processo. De acordo com a empresa, são geradas em média 3 toneladas mensais do resíduo.

A coleta do material foi feita direta das bags através de baldes, e, apresentava uma consistência pastosa. Após secagem, o material fica na forma de grandes torrões (Figura 1), tornando necessário o processo de destorroamento com auxílio de almofariz, pistilo, martelo e liquidificador. Foi utilizado nessa pesquisa o material passante na peneira #4 (abertura 4,75mm).

Figura 1 - Resíduo de vidro como coletado.



Fonte: Afonso (2019).

2.2. Coleta e preparação do solo

Toda a amostra de solo foi coletada no Campus Glória da Faculdade Federal de Uberlândia (UFU) com auxílio de trator agrícola, com trado tipo rosca de 250mm de diâmetro e perfuração de até 1,50m de profundidade. Foram coletados cerca de 100kg de amostra deformada com umidade média de 32%.

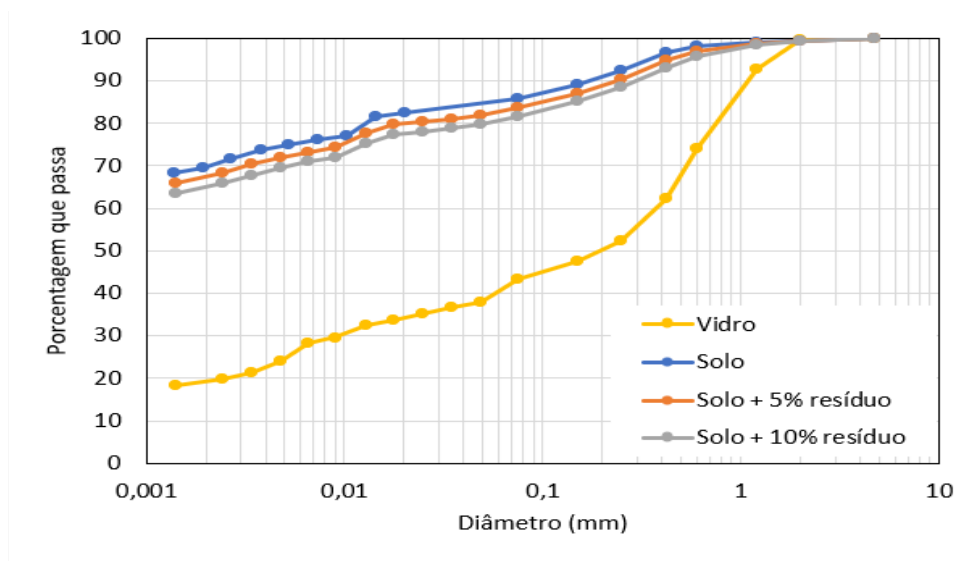
2.3. Misturas de solo e resíduo

Para a realização do estudo, com base nos resultados de Blayi et al. (2020), Afonso (2019) e Andrade (2022), que determinaram a dosagem ótima do resíduo entre 5% e 15% optou-se por duas proporções de mistura, 5% e 10% de resíduo em relação à massa de solo.

2.4. Ensaio de caracterização e compactação

A amostra de solo e o resíduo de vidro foram caracterizados por Andrade (2022) por meio de ensaios de massa específica dos grãos e curva granulométrica. A partir destes resultados, foram calculadas as curvas granulométricas para as misturas, que são mostradas na Figura 2. As frações granulométricas encontram-se na Tabela 1.

Figura 2 - Curvas granulométricas.



Fonte: Andrade (2022).

Tabela 1 - Porcentagens das frações granulométricas.

| Material | Argila | Silte | Areia Fina | Areia Média | Areia Grossa | Pedregulho |
|--------------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Solo | 69,40% | 13,20% | 6,60% | 9,00% | 1,30% | 0,50% |
| Solo + 5% resíduo | 68,40% | 13,60% | 8,50% | 6,50% | 2,60% | 0,50% |
| Solo + 10% resíduo | 63,40% | 18,20% | 6,80% | 7,30% | 3,80% | 0,50% |

Fonte: Andrade (2022).

Para o solo e as misturas, foram realizados ensaios de limites de consistência, cujos resultados estão na Tabela 2 juntamente com os dados de massa específica dos grãos e classificação unificada. O solo foi também classificado pela MCT (Miniatura Compactada Tropical) por Carminati (2017) como laterítico argiloso (LG’).

Tabela 2 - Limites de consistência, massa específica dos grãos e classificação unificada.

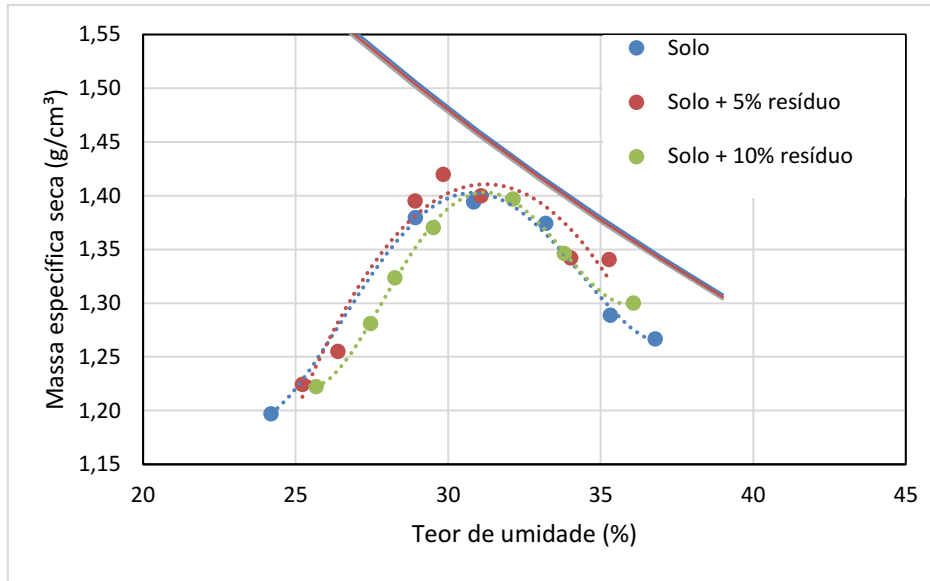
| Material | Limite de liquidez (%) | Índice de plasticidade (%) | Massa específica dos grãos (g/cm³) | Classificação unificada |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| Solo | 56 | 21 | 2,67 | MH |
| Solo + 5% resíduo | 38 | 7 | --- | ML |
| Solo + 10% resíduo | 37 | 6 | --- | ML |
| Vidro | --- | NP | 2,49 | SM |

Fonte: Adaptado de Andrade (2022).

Assim como verificado por Bilgen (2020) o aumento do percentual resíduo na mistura levou à diminuição no limite de liquidez. Por outro lado, a tendência de variação do limite de plasticidade diverge do observado pelo autor.

Ensaio de compactação foram realizados na energia Proctor Normal e serviram de referência para a preparação dos corpos de prova deste estudo. As curvas de compactação são mostradas na Figura 3 e os pontos ótimos de compactação foram resumidos na Tabela 3.

Figura 3 - Curvas de compactação e saturação 100%.



Fonte: Andrade (2022)

Tabela 3 - Pontos ótimos de compactação.

| Material | Massa específica seca máxima (g/cm³) | Umidade ótima (%) |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Solo | 1,39 | 30,8 |
| Solo + 5% resíduo | 1,42 | 29,8 |
| Solo + 10% resíduo | 1,40 | 32,1 |

Fonte: Adaptado de Andrade (2022).

Como notado por Andrade (2022), não houve variação significativa nos pontos ótimos de compactação em função da adição do resíduo de vidro. No entanto, de acordo com Blayi et al. (2018), que estudou solos expansivos, e Castro et al. (2019), que estudou um solo argiloso, o esperado seria que as composições apresentassem um aumento na massa específica seca e queda na umidade ótima com o aumento da porcentagem de resíduo de vidro. Os resultados de Afonso (2019), para o mesmo solo desta pesquisa com 15% de adição de resíduo de vidro, também seguiram a tendência observada por Blayi et al. (2018) e Castro et al. (2019).

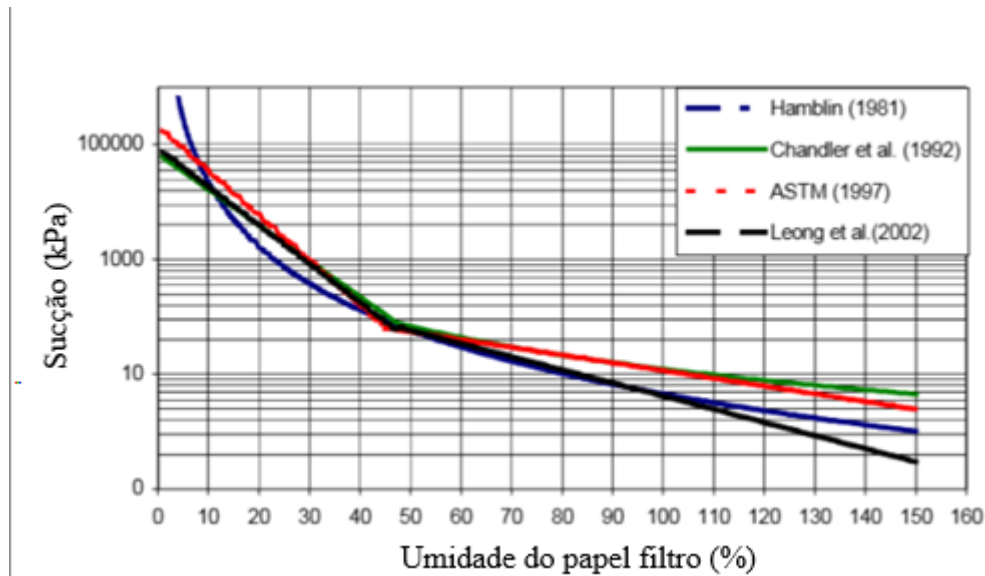
2.5. Ensaio de papel filtro

Uma curva de retenção de água foi obtida para a condição de 10% de resíduo adicionado com o objetivo de subsidiar análises do ensaio de compressão edométrica na

umidade de compactação e também para comparação com a curva de retenção do solo virgem apresentada por Carminati (2017).

Foi utilizado o ensaio de papel filtro, normatizado pela ASTM D5298-16, que fornece bons resultados para altos valores de sucção. O método se baseia em obter o equilíbrio de sucção entre o solo e o papel filtro, quando em contato e em recipiente hermeticamente fechado. Após o equilíbrio, mede-se a umidade do papel filtro e é determinado potencial matricial do solo a partir da curva de calibração do papel. Neste trabalho foi usado o papel filtro Whatman N° 42 e a calibração de seguindo a literatura de Chandler (1992) para o cálculo da sucção matricial do papel filtro Whatman n° 42.

Figura 4 - Curvas de calibração para o papel filtro Whatman N° 42.



Fonte: Moncada (2004).

Nas figuras 6 e 7 observam-se duas etapas do ensaio, sendo o corpo de prova compactado para cravação de anel e o corpo de prova sob efeito de capilaridade.

Figura 5 - Corpo de prova compactado para cravação em anel.



Fonte: Autor (2022).

Figura 6 - Corpos de prova submetidos a ação da capilaridade por pedra porosa.



Fonte: Autor (2022).

Além disso, foram testados três modelos de ajuste para a curva de retenção da mistura, sendo eles: Pham e Fredlund (2008) simplificado; Van Genuchten (1980), equação 1; e Fredlund e Xing (1994) sem correção, equação 2.

$$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_{vg}}\right)^{n_{vg}}\right]^{m_{vg}}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$w = C(\psi) \frac{w_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right)\right]^{m_f}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

w_s = teor de umidade em 1 kPa de sucção;

ψ = sucção do solo;

a , n , m e $C(\psi)$ = parâmetros do solo;

Pham e Fredlund (2008), relacionaram o teor de umidade e a sucção em solo propondo a equação 3.

$$\frac{dw}{d\psi} = \frac{d(e/G_s)}{d\psi} = \left\{ \frac{c_c}{G_s} \text{ para } \psi > p_c \text{ e } \frac{c_s}{G_s} \text{ para } \psi \leq p_c \right\} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

w = teor de umidade gravimétrico;

e = índice de vazios;

G_s = gravidade específica;

c_s = índice de carregamento e descarregamento;

c_c = índice de compressão virgem;

p_c = tensão de pré-adensamento;

Segundo Valle (2003), a equação 4 é baseada em pontos notáveis da curva de retenção (Figura 7).

$$w(\psi) = \left\{ [w_{sat} - S_1 \log(\psi) - w_r] \frac{a}{\psi^{b+a}} + w_r \right\} \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \quad \text{Eq. 4}$$

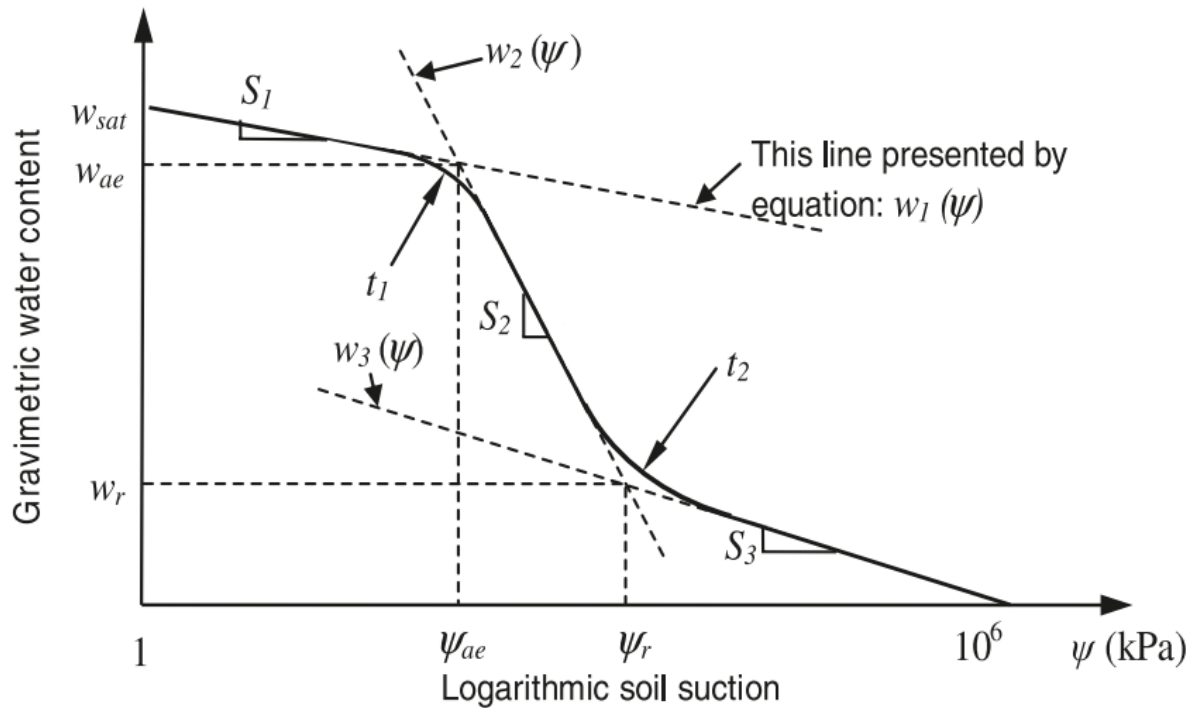
Onde:

w_{sat} = teor de umidade em 1 kPa de sucção;

ψ_r = sucção residual;

ψ_{ae} = valor de entrada de ar;
 w_r = teor de umidade residual;
 a, b = parâmetros de ajuste;
 S_1 = inclinação da reta da curva na parte anterior ao valor de entrada de ar;

Figura 7 - Curva de retenção típica de um solo coesivo com as indicações das variáveis envolvidas



Fonte: Pham e Fredlund (2008).

2.6. Ensaios de compressão edométrica

A fim de verificar alterações na compressibilidade do solo em função da adição do resíduo, foram realizados ensaios edométricos duplos com corpos de prova moldados na umidade ótima para misturas e solo virgem. Além do efeito da quantidade de resíduo, o efeito da sucção associada à umidade de compactação também foi investigado.

Foram realizados ensaios com corpos de prova na umidade de compactação (sucção) e inundados, submetendo-os a estágios de tensões no intervalo de 10 kPa a 320 kPa, com valores crescentes, e logo em seguida realizado o descarregamento. Para cada par de ensaios realizados na umidade ótima e inundado foi associada a nomenclatura de ensaio duplo. Os ensaios edométricos foram realizados de acordo com a NBR 16853 (ABNT, 2020).

Figura 8 - Ensaio edométrico duplo em andamento (Fase de carregamento).



Fonte: Autor (2022).

3. RESULTADOS

3.1. Ensaio de papel filtro

Os corpos de prova moldados com 10% de adição de resíduo e ensaiados pelo método do papel filtro tiveram seus índices físicos médios calculados e estão mostrados na Tabela 4. A massa específica dos sólidos foi estimada por uma média ponderada dos valores obtidos experimentalmente para o solo e para o resíduo de vidro.

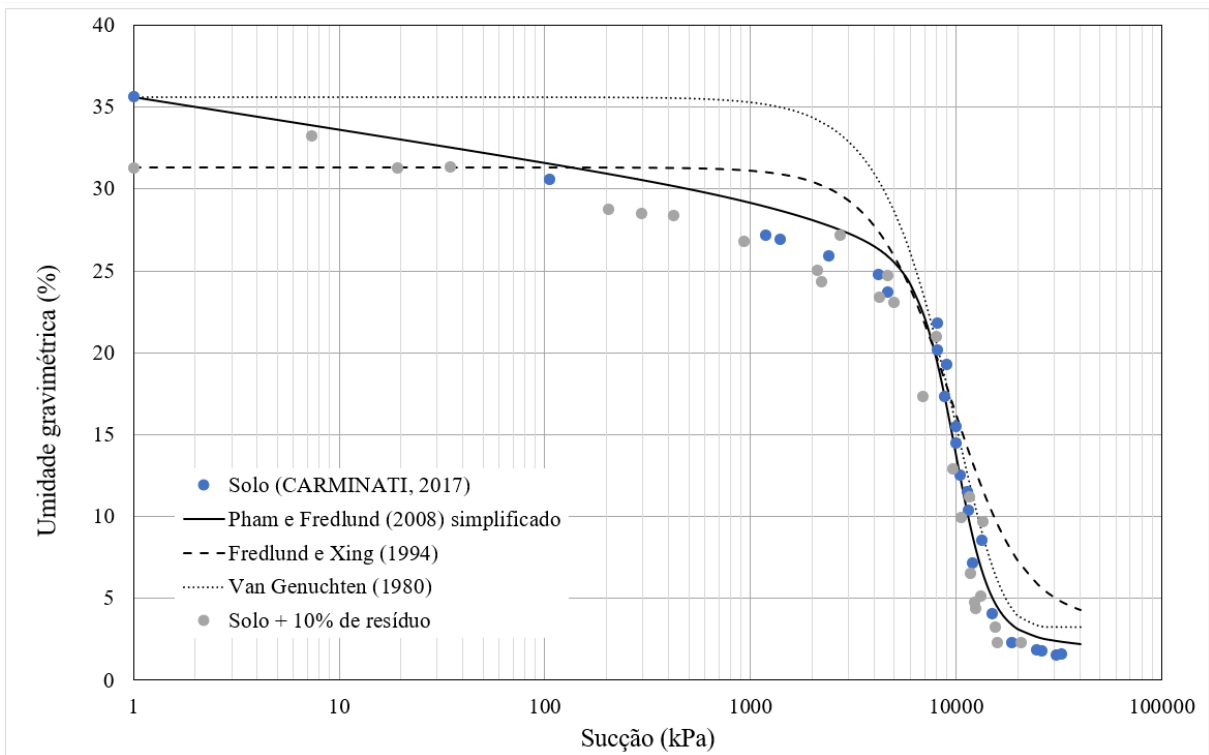
Tabela 4 - Índices físicos médios dos corpos de prova.

| Massa específica g/cm³ | Massa específica seca g/cm³ | Massa específica dos sólidos g/cm³ | n % | Sr % | Umidade de moldagem média % |
|--|---|--|----------------|-----------------|--|
| 1,896 | 1,449 | 2,652 | 45,4 | 99,0 | 30,82 |

Fonte: Autor (2023).

A curva de retenção de água obtida para a mistura está mostrada na Figura 9, junto com a curva para o solo, obtida por Carminati (2017). Percebe-se uma sobreposição dos dados experimentais para as duas condições, que era esperada pelo fato de as curvas de compactação estarem praticamente sobrepostas, e por consequência os índices de vazios são praticamente iguais para os dois casos.

Figura 9 - Curva de retenção de água.



Fonte: Autor (2023).

A umidade de saturação apresentada na Figura 9 foi calculada a partir dos índices físicos médios dos corpos de prova, resultando em 31,32%. O trecho inicial de ambas as curvas não estão suficientemente definidas, o que é uma dificuldade associada ao método experimental. A umidade ótima de compactação, em torno de 31%, encontra-se nesse trecho. Já o trecho de dessaturação, com maior inclinação, foi bem caracterizado pelo método.

Quando se trata de caracterização da condição não saturada de um material, existem dois pontos de principal interesse na curva de retenção, a sucção de entrada de ar e a umidade residual. Os resultados forneceram valores de 8000 kPa de sucção com 21% de umidade na entrada de ar, e a dessaturação ocorrendo até sucções por volta de 15300 kPa, com uma umidade residual próxima a 3%.

Foram testados três modelos de ajuste para a curva de retenção da mistura, sendo eles: Pham e Fredlund (2008) simplificado, Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) sem correção. O primeiro trata-se de um modelo desenvolvido para aplicação em solos expansivos, para os quais o trecho inicial da curva é inclinado e os demais são modelos tradicionalmente empregados. Os parâmetros de ajuste de cada modelo encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de ajuste.

| PHAM E FREDLUND (2008) | | VAN GENUCHTEN (1980) | | FREDLUND E XING (1994) | |
|-------------------------------|----------|-----------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| S1 | 1,99E+00 | α | 1,79E-06 | a | 10000,00 |
| a | 1,96E+20 | m | 3001,95 | m | 2,85 |
| b | 5,07E+00 | n | 1,99 | n | 2,17 |
| ψ_r | 12842,78 | wres (%) | 3,24 | wres (%) | 3,24 |
| wres (%) | 3,24 | wsat (%) | 35,64 | ψ_{res} (kPa) | 15400 |
| wsat (%) | 35,64 | r ² | 0,956 | wsat (%) | 31,32 |
| r ² | 0,971 | | | r ² | 0,954 |

Fonte: Autor (2023).

3.2. Ensaios de compressão edométrico duplo

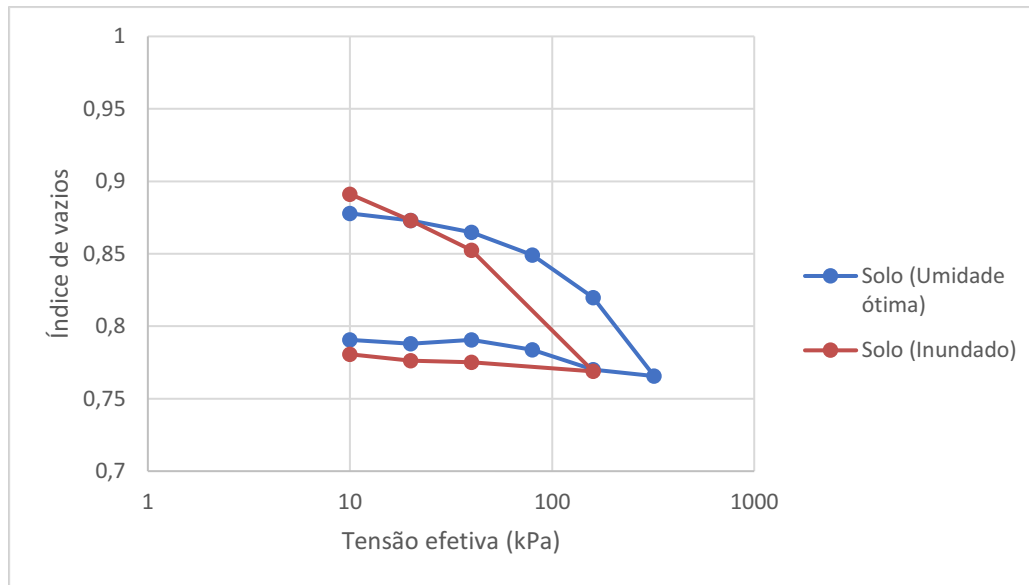
Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas as curvas de compressão obtidas nos ensaios edométricos e nas figuras 13 e 14 estão os índices de compressão (Cc) e recompressão (Cr) calculados a partir dessas curvas.

Tabela 6 - Índices físicos corpos de prova para ensaio edométrico duplo.

| Material | Massa específica g/cm³ | Massa específica seca g/cm³ | Massa específica dos sólidos g/cm³ | Umidade de moldagem % |
|------------------------------------|--|---|--|--|
| Solo (Inundado) | 1,811 | 1,387 | 2,670 | 30,59 |
| Solo (Umidade ótima) | 1,822 | 1,388 | 2,670 | 31,23 |
| Solo + 5% resíduo (Inundado) | 1,790 | 1,358 | 2,661 | 31,78 |
| Solo + 5% resíduo (Umidade ótima) | 1,794 | 1,372 | 2,661 | 30,83 |
| Solo + 10% resíduo (Inundado) | 1,791 | 1,368 | 2,652 | 30,90 |
| Solo + 10% resíduo (Umidade ótima) | 1,787 | 1,365 | 2,652 | 30,93 |

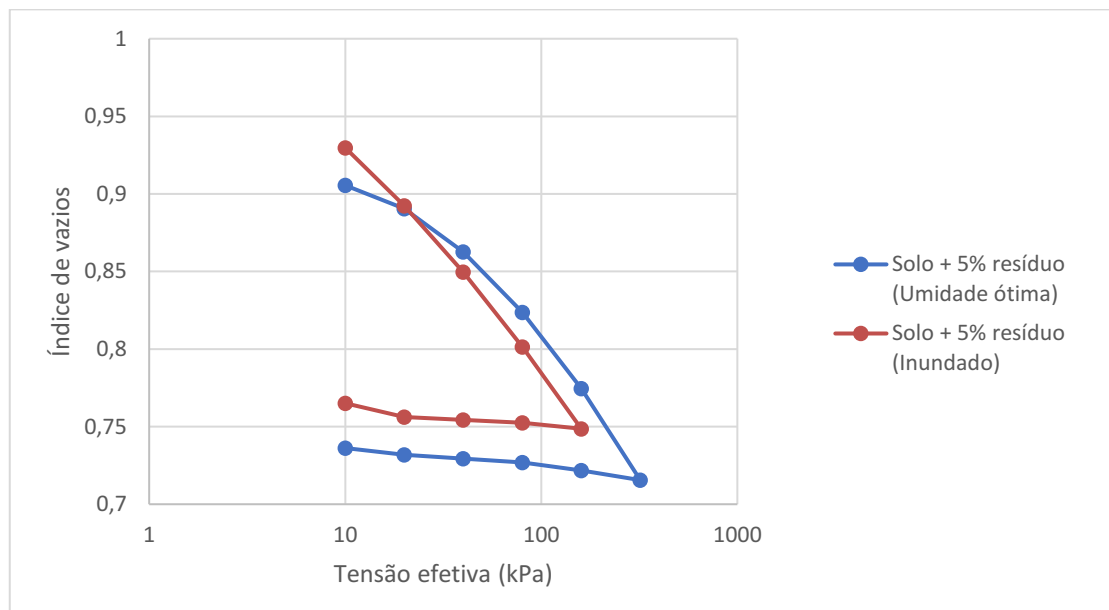
Fonte: Autor (2022).

Figura 10 - Ensaio edométricos com solo virgem.



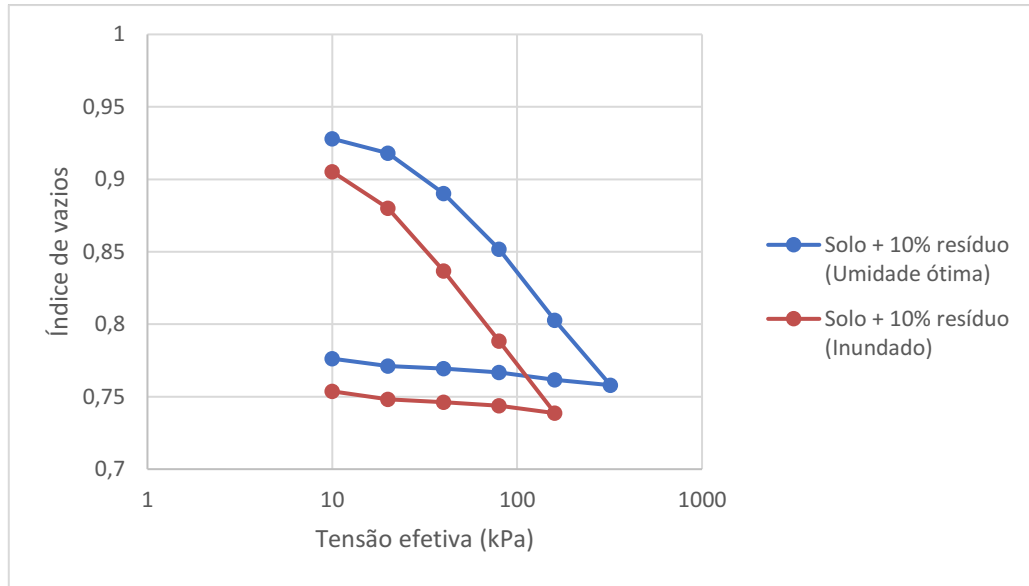
Fonte: Autor (2022).

Figura 11 - Ensaio edométricos com mistura solo + 5% de resíduo.



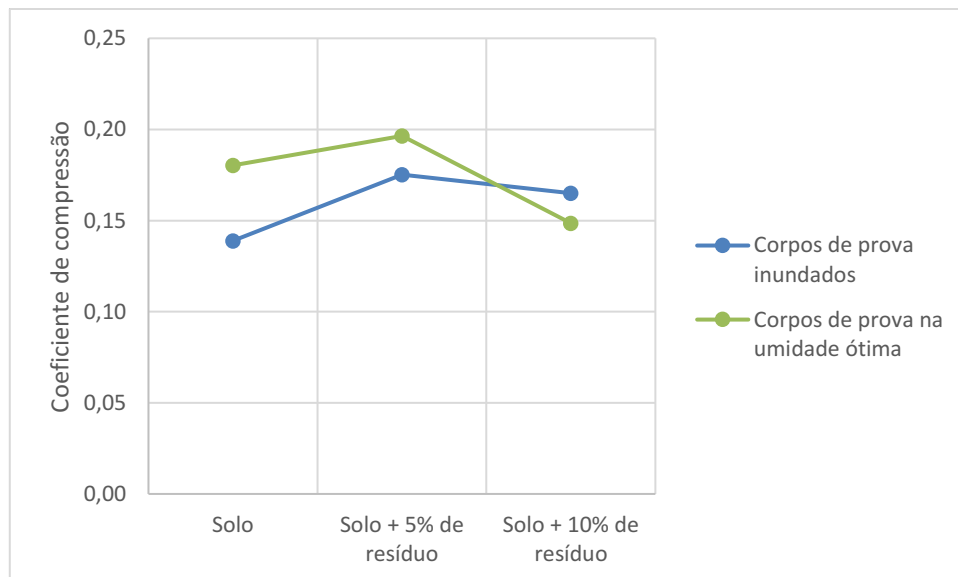
Fonte: Autor (2022).

Figura 12 - Ensaio edométrico com mistura solo + 10% de resíduo.



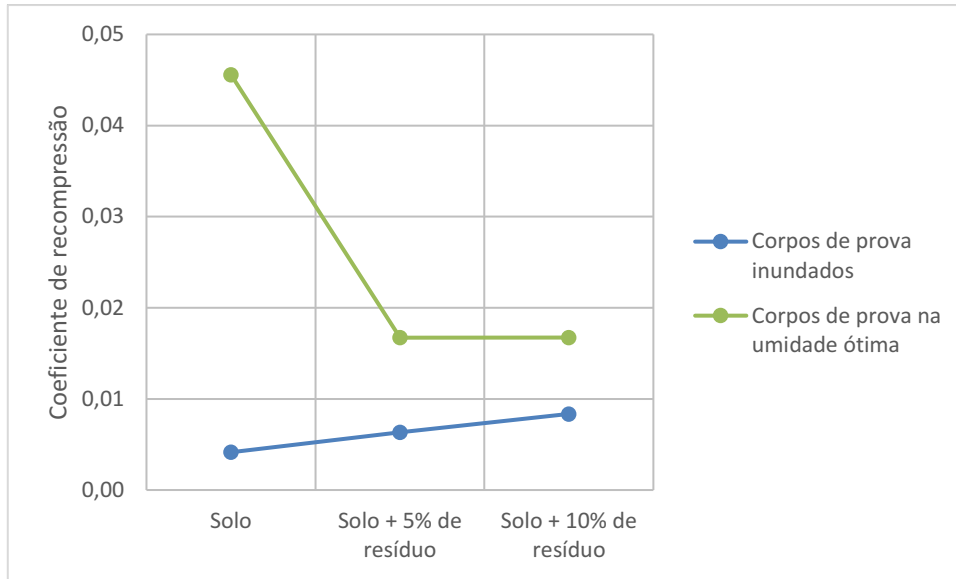
Fonte: Autor (2022).

Figura 13 – Variação do índice de compressão nos ensaios edométricos.



Fonte: Autor (2022).

Figura 14 - Variação do índice de recompressão nos ensaios edométricos.



Fonte: Autor (2022).

Os resultados apresentam diferenças marcantes entre os valores de índice de compressão e recompressão, como esperado. Quando se comparam as condições de preparação dos corpos de prova e as condições de ensaio (inundado e umidade ótima) não são notadas variações significativas nos parâmetros de compressibilidade. Em relação à adição de resíduo de vidro, a porcentagem de adição pode ter sido pequena o suficiente para seu efeito não ser notado, como também ocorreu nas curvas de compactação. Já no que se refere à condição de ensaio, o elevado grau de saturação na compactação reduziu os efeitos de sucção sobre a compressibilidade dos corpos de prova.

4. CONCLUSÕES

Misturas de um solo argiloso e resíduo da indústria de vidro foram testados para uma avaliação de suas propriedades geotécnicas, mais especificamente a compressibilidade e a retenção de água.

Embora pesquisas que analisaram a resistência de misturas solo-resíduo de vidro tenham verificado vantagens na adição deste resíduo, como no caso de Bilgen (2020) e Andrade (2022) por exemplo, os resultados obtidos nesta pesquisa não mostraram efeito relevante no que se refere à compressibilidade avaliada por meio de ensaios edométricos.

De modo semelhante, não foi observada influência significativa da presença do resíduo nos dados experimentais de curva de retenção de água. Neste caso, atribui-se o comportamento observado aos índices de vazios de valores próximos que resultam da compactação dos corpos de prova de solo e mistura.

Ainda assim, cabe mencionar que a investigação de possibilidades de reciclagem ou reuso de materiais que seriam destinados a aterros sanitários têm sua importância na redução de impactos ambientais, e sugere-se a ampliação dos estudos abrangendo mais tipos de solos e outras porcentagens de adição de resíduo.

REFERÊNCIAS

- AFLITOS, A. O.; PEREIRA, J. H. F.; CARVALHO, J. C. de; MENDONÇA, M. B. Projeto for moso A - implantação de obras localizadas com fundações em solos colapsíveis. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, Salvador, v. 2, p. 101-108, 1990.
- AFONSO, A. C. **Análise do desempenho mecânico de uma mistura de solo argiloso e resíduo de vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- AGNELLI, N; ALBIERO, J. H. Aspectos físicos, químicos e mecânicos de um solo colapsível, inundado com diferentes líquidos. **Solos e Rochas**, v. 20, n. 2, p. 79-95, 1997. Acesso em: 25 jan. 2023.
- ANDRADE, L. F. **Resistência à compressão de misturas de solo argiloso laterítico e resíduo de vidro**. Relatório de Iniciação Científica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5298-16: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. ABNT, Rio de Janeiro, 2020.
- BENNY, J. R.; JOLLY, J.; SEBASTIAN, J. M.; THOMAS, M. Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN, p. 2278-0181, 2017. DOI: 10.17577/IJERTV6IS050024.
- BILGEN, G. Utilization of Powdered Glass as an Additive in Clayey Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-012157>.
- CARMINATI, N. **Caracterização e classificação geotécnica de um solo de Uberlândia: aspectos lateríticos e de retenção de água**. Relatório de Iniciação Científica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- CHAGAS, Gleiber da Silva; MOURA, Alfran Sampaio; CARNEIRO, Andressa de Araujo. Avaliação da compactação como melhoramento de um solo silto, argiloso, colapsível, um partidor da realização de ensaios edométricos e provas de carga diretas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 1, p. 3-19, jan.-jun. 2019.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; SMITH, M. G. (1992). A low-cost method of assessing clay

desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, p. 82-89, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1680/icien.1992.18771>.

CONSOLI, N. C.; CARRETTA, M. D. S.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; TOMASI, L. F. Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, 2018. DOI:10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002571.

DAVIDOVIĆ, N.; BONIĆ, Z.; PROLOVIĆ, V. Waste glass as additive to clayey material in subgrade and embankment of road pavement. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, v. 10, n. 2, p. 215 – 222, 2012. DOI: 10.2298/FUACE1202215D.

FERREIRA, M. de C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 18, p. 1-12, novembro, 2011. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art1_N18.pdf. Acesso em: 17 dez. 2022.

FREDLUNG, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n.3, p.521-532, 1994.

IPEA. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**, 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 17 dez. 2022.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção em solos**. In: **Simpósio brasileiro de solos não saturados**, 3., 2007, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Editora Freitas Bastos, 1997. v. 2, p. 373-398

MONCADA, M. P. H. **Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. 219 p

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 2012

PHAM, H. Q., & FREDLUND, D. G. (2008). Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil. **Canadian Geotechnical Journal**, 45(4), 443–453. doi:10.1139/t07-117

PIVETTA, C. P. **Utilização de resíduo de construção e demolição em solo compactado**. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira do Sul, Cerro Largo -

RS, 2017. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1759/1/PIVETTA.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2022.

QUINTANILHA, F. S. **Avaliação de utilização e desempenho de resíduos de construção e demolição em bases e subbases de pavimentos flexíveis**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2008.

RIBEIRO, A. O. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. 86 f. Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14232>. Acesso em: 17 dez. 2022.

RIZGAR A. BLAYI; SHERWANI A. F. H.; HAWKAR H. I.; RABAR H. F.; AKO D. **Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder**. *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020) e00427.

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/18660/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2022.

RODIER, L.; SAVASTANO JUNIOR, H. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal Of Cleaner Production**, São Paulo, v. 184, p. 333-341, 20 mar. 2018.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306012>. Acesso em: 17 dez. 2022.

RODRIGUES, R. A.; SOUZA, A.; LOLLO, J. A. **Estudo da colapsividade dos solos de Ilha Solteira (SP) para projetos de fundações rasas e profundas**. In: **XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 2002, São Paulo. Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. São Paulo: ABMS, 2002.

ROQUE, P. F. B. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação**. Tese de Doutorado em Geotecnia — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 91-100, 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6

SILVEIRA, E. B. S. **Low cost shallow foundation**. 1963, Anais. São Paulo: **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1963**. Acesso em: 25 jan. 2023.

SILVEIRA, L.R.; BORGES, R. A. Uso de materiais alternativos para melhoria de solo na pavimentação de vias. **Engineering and Science**, v.1, n.5, 2016. Disponível em:

<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3418>. Acesso em: 17 dez. 2022.

UGW - User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Publication Number: FHWA-RD97-148. Office of Research, Development, and Technology, Office of Safety, RDT.

Disponível em:

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/wg1.cfm>. Acesso em: 17 dez. 2022.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. **Soil Science Society of America Journal**, 44(5), 892.

DOI:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

FOLHA DE ASSINATURAS

Carlos Henrique P de Araújo

Aluno: Carlos Henrique Parreira de Araújo

Giovana B Georgetti

Orientadora: Prof^a. Dra. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, 26 de janeiro de 2023.