



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UMA MISTURA DE SOLO ARGILOSO E RESÍDUO DE VIDRO

Aluno: Andressa Cristina Afonso

Matrícula: 11411ECV024

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, janeiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela minha família e por me guiar e ajudar diante de todas as dificuldades encontradas. Aos meus pais, agradeço pelo apoio, por terem me dado a oportunidade de cursar Engenharia Civil e por me incentivarem sempre a superar os meus limites.

Agradeço também a minha família: irmãos, avós, tios e primos, que foram peças fundamentais em todo o meu desenvolvimento. Sou grata em especial à Mariana, Maria Luiza e Davi, minhas primas e irmão, que dedicaram o seu tempo para me ajudar a realizar ensaios no laboratório de Mecânica dos Solos, tendo uma participação especial na conclusão deste trabalho.

Fica também a minha gratidão à minha orientadora, Prof^ª. Dra. Giovana Bizão Georgetti, que foi fundamental para a finalização deste trabalho, sempre disponível para me ajudar, tirando minhas dúvidas, me ensinando a fazer ensaios e me ajudando a encontrar o caminho todas as vezes que encontrei dificuldades.

Agradeço ao Túlio Florença Tavares, técnico do laboratório de mecânica dos solos, que esteve sempre disponível para me ajudar na execução dos ensaios. Por fim, agradeço ao Prof. Joaquim Caleiro Acerbi, pelas ideias e contribuição na execução do meu trabalho.

RESUMO

O solo é um material de comportamento complexo e de significativa variabilidade espacial. Sendo assim é comum que em seu estado natural ele não apresente as condições necessárias para o assentamento de fundações superficiais, que requerem capacidade de suporte relativamente elevada a baixas profundidades. Existem alguns métodos para melhorar as propriedades mecânicas do solo, alguns deles contam com a adição de materiais ao solo, sendo que as misturas podem reagir quimicamente ou apenas fisicamente. Atualmente, visando diminuir impactos ambientais, alguns estudos vêm sendo realizados incorporando resíduos industriais aos solos, como cinzas volantes, resíduos de construção civil e resíduo de vidro. O resíduo de vidro é um resíduo destinado a aterros, não tendo ainda uma aplicação no mercado, entretanto, vem sendo realizados alguns estudos que obtiveram bons resultados ao utilizá-lo em argamassas e até mesmo em solos, sendo misturado sozinho ou junto a outros componentes. Diante disto, neste estudo testou-se uma mistura de resíduo de vidro em um solo argiloso, no teor de 15%, para analisar seu desempenho mecânico através de ensaios de compressão simples e Índice de Suporte Califórnia, realizando comparações entre a mistura e o solo em seu estado natural. Através da caracterização e análise mecânica da mistura foram notadas algumas mudanças no comportamento do solo quando misturado ao vidro, os ensaios apontaram uma redução da resistência e aumento na deformabilidade do material para o teor testado, trazendo conhecimentos e parâmetros para futuros experimentos.

Palavras-chave: solo argiloso, resíduo de vidro, melhoria de solos, compressão simples, CBR.

ABSTRACT

Soil is a material of complex behavior and significant spatial variability. Therefore, in its natural state it does not present the necessary conditions for the laying of surface foundations, which require relatively high support capacity at low depths. There are some methods to improve the mechanical properties of the soil, some of them rely on the addition of materials to the soil, and the mixtures can react chemically or only physically. Nowadays, with the aim of diminishing environmental impacts, some studies have been carried out and they have been incorporating industrial residues to the soils, as fly ash, construction waste and glass residue. Glass residue is a waste destined to landfills and has not been applied to the market yet, however, some studies that have obtained good results when using it (mixed alone or with other components) in mortars and even in soils have been carried out. Therefore, in this study, a glass residue mixture was tested in a 15% clay soil to analyze its mechanical performance through unconfined compression tests and California bearing ratio test by making comparisons between the mixture and the soil in its natural state. The characterization and mechanical analysis of the mixture revealed some changes in the behavior of the soil when mixed with the glass. The tests indicated a reduction of the resistance and increase in the deformability of the material for the tested content, providing knowledge and parameters for future experiments.

Key-words: Clay soil, glass residue, soil improvement, unconfined compression tests, CBR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tanque de passagem da água com resíduo de vidro em suspensão.....	17
Figura 2 - Bolsões de armazenamento do resíduo de vidro.....	17
Figura 3 - (a) Resíduo de Vidro Úmido e (b) Resíduo de Vidro Seco	17
Figura 4- Resíduo de Vidro.....	18
Figura 5 - Ensaio de determinação da massa específica dos grãos	19
Figura 6 - Ensaio de Sedimentação	21
Figura 7 - Coleta da amostra no Campus Glória.....	23
Figura 8 - Curva Granulométrica do Solo do Campus Glória.....	24
Figura 9 - Curva de Compactação Campus Glória.....	25
Figura 10 - (a) Solo no estado natural, (b) Solo e vidro, (c) Mistura de solo e vidro.....	25
Figura 11 - Destorroamento do solo para ensaio com reuso	26
Figura 12 - Ensaio de compactação da mistura solo e vidro	27
Figura 13 - Ensaio de Expansão (a) Solo Natural (b) Mistura Solo-Vidro	28
Figura 14 - Ensaio de CBR	29
Figura 15 - Curvas granulométricas do resíduo de vidro	31
Figura 16 - Ensaio de compactação da mistura (com e sem reuso).....	33
Figura 17 - Ensaio de Compactação do Solo e da Mistura Solo-Vidro	33
Figura 18 - Compressão simples em amostras de solo e mistura de solo e resíduo de vidro.....	34
Figura 19 - (a) Ruptura Corpo de Prova 1 (b) Ruptura Corpo de prova 2 - Solo Natural.....	36
Figura 20 - (a) Ruptura Corpo de Prova 1 (b) Ruptura Corpo de prova 2 - Mistura Solo e Resíduo de Vidro.....	36
Figura 21 - Ensaio CBR - Curvas Penetração x Pressão	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica dos materiais utilizados nos estudos de Winter	14
Tabela 2 - Composição granulométrica dos materiais	32
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de compressão simples	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Vidro como resíduo da construção civil.....	9
2.1.1 Utilização do resíduo de vidro.....	10
2.2 Melhoria de solos	11
3 MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL	16
3.1 Características do resíduo de vidro	16
3.1.1 Massa específica dos grãos.....	18
3.1.2 Granulometria.....	20
3.2 Características do solo.....	23
3.3 Adição de resíduo de vidro ao solo	25
3.3.1 Compactação	26
3.3.2 Compressão simples	27
3.3.3 Índice de suporte Califórnia	28
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	31
4.1 Massa específica dos grãos e granulometria do resíduo	31
4.2 Compactação da mistura	32
4.3 Compressão simples da mistura	34
4.4 Índice de suporte Califórnia da mistura	37
5 CONCLUSÃO	40
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42
FOLHA DE ASSINATURAS	46

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material de comportamento complexo e de significativa variabilidade espacial. Sendo assim é comum que em seu estado natural ele não apresente as condições necessárias para o assentamento de fundações superficiais, que requerem capacidade de suporte relativamente elevada a baixas profundidades. Entretanto, a utilização desse tipo de fundação costuma ser bem mais barata que a execução de fundações profundas, que é a alternativa utilizada para transmitir carregamento ao solo em profundidade.

O engenheiro geotécnico tem algumas alternativas para viabilizar a execução de obras sobre solos pobres, dentre elas estão a substituição do material existente por outro com características adequadas ou a melhoria das propriedades do solo existente, realizando modificações que criam um material que possibilite o uso de fundações superficiais (INGLES & METCALF, 1972 *apud* CASAGRANDE, 2001).

Na tentativa de melhorar solos naturais e proporcionar destinos ambientalmente adequados para resíduos da indústria, tem-se estudado a associação de solos compactados com materiais como cinzas volantes, fosfogesso e resíduos de construção civil, por exemplo (KARTHIK et al., 2014 e SILVEIRA e BORGES, 2015). Atualmente, tem surgido algumas pesquisas abordando a aplicação de resíduo de vidro na construção civil.

O resíduo de vidro é um material gerado pelo polimento de bordas de peças constituídas por este material e por furos e recortes feitos nelas para o encaixe de ferragens e acessórios. De acordo com a Associação Nacional de Vidraçarias (2018), este material não tem serventia para a indústria vidreira, não é reciclado e deve ser descartado em aterros industriais, sendo primeiramente tratado. Entretanto, nem sempre a população e a indústria se importam em dar um destino adequado para o produto, o que gera impactos ambientais. Dessa forma, mostra-se interessante a possibilidade do reaproveitamento do resíduo de vidro.

Segundo a Associação Nacional de Vidraçarias (2018), uma pesquisa da Universidade Federal de Ouro Preto sobre a substituição da cal hidratada por resíduo de vidro em argamassas de revestimento detectou um aumento na resistência à compressão simples conforme o percentual de resíduo de vidro aumentava, e uma menor

necessidade de água para se chegar à consistência desejada da argamassa, aumentando a durabilidade do material.

Diante da pesquisa citada e de outros temas em que o assunto vem sendo abordado, como a fabricação de cerâmicas, optou-se por utilizar este material para uma tentativa de melhoria das características de resistência e deformabilidade de solos argilosos. Este trabalho busca caracterizar o comportamento mecânico de uma mistura de solo argiloso com resíduo de vidro, avaliando a variação de sua resistência em ensaios de compressão simples e índice de suporte Califórnia com relação à condição original, sem adição. As avaliações realizadas têm como foco apenas as interações físicas que ocorrem na mistura, não considerando possíveis reações químicas que podem ocorrer entre as partículas mais finas do resíduo de vidro com o solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para contextualização do assunto abordado neste trabalho, é apresentada nesta seção uma revisão bibliográfica sobre o vidro como resíduo, a origem do resíduo de vidro e algumas possíveis aplicações na construção civil e na geotecnia, bem como os tipos de melhoria de solos, que é a área na qual se estuda aplicar este resíduo.

2.1 Vidro como resíduo da construção civil

O vidro é um material muito utilizado na construção civil, sendo empregado em fachadas, janelas, portas e box de banheiros. De acordo com Ribeiro (2015), o tipo de vidro mais utilizado na construção civil é o denominado sodo-cálcico. Este material é resultante da fusão de uma mistura de diversos óxidos inorgânicos e tem como constituinte principal a sílica (óxido de silício), que enrijece sem cristalizar após sofrer um processo de resfriamento (SICHERI, CARAM e dos SANTOS, 2007, *apud* RIBEIRO, 2015).

Com sua ampla utilização, o vidro é um dos resíduos sólidos gerados pela construção civil. Conforme citado pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (2019), a indústria vidreira brasileira produz cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano. A Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (2018) afirma que as indústrias destinadas à produção de vidros planos no Brasil tem uma capacidade produtiva de 6680 toneladas de vidro por dia e de acordo com Ad Normas (2018) quase 55% do total de vidro produzido no país é destinado à construção civil. Sendo assim, nota-se que a construção civil gera uma quantidade significativa de resíduo de vidro.

De acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (2019), 47% das embalagens de vidro produzidas em 2011 foram recicladas. A reciclagem é um processo simples, mas que contém limitações quanto às características dos materiais. Os cacos encaminhados para reciclagem não podem conter pedaços de cristais, espelhos, lâmpadas e vidro plano usado nos automóveis e na construção civil. Por terem composição química diferente, esses tipos de vidro causam trincas e defeitos nas embalagens. Além disso, os materiais enviados para a reciclagem não podem ter nenhum tipo de contaminação.

A ABNT NBR 10004:2004 classifica os resíduos sólidos de acordo com a sua periculosidade, enquadrando o vidro como um resíduo de classe II B, do que se infere que o vidro é um resíduo não perigoso e inerte. Esse tipo de resíduo tem como características não sofrer alteração em sua composição ao longo do tempo, podendo ser reciclado ou depositado em aterros. Além disso, esses resíduos não poluem porque não alteram o solo e nem as águas, tendo em vista que quando em contato com ambos não são liberadas substâncias que prejudiquem o meio ambiente (VG RESÍDUOS, 2018).

A resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) também se refere à classificação e gestão de resíduos, entretanto, trata especificamente daqueles gerados pela construção civil, visando diminuir impactos gerados no meio ambiente. A Resolução considera que os resíduos da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas, o que mostra uma evidente viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem destes. Através desta consideração pode-se perceber que a reutilização do resíduo de vidro seria vantajosa.

De acordo com esta resolução, o resíduo de vidro se enquadra na Classe B e é considerado reciclável para outras destinações. Na Classe B encontram-se também plásticos, papel, papelão, metais, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.

2.1.1 Utilização do resíduo de vidro

Atualmente, o resíduo de vidro não é reutilizado na construção civil, entretanto, tem sido foco de estudos para incorporação em argamassa, substituindo parte do aglomerante que seria utilizado. O resíduo com granulometria passante na peneira com abertura de 0,075 mm possui propriedades pozolânicas que podem ser responsáveis por resultados positivos já encontrados.

Ribeiro (2015) estudou a incorporação de resíduo de vidro em argamassas. Foram ensaiados diferentes traços no estudo, com o resíduo de vidro substituindo diferentes porcentagens em massa do cimento (5%, 10%, 15%, 20% e 25%), sendo que alguns mantiveram constante a relação água-cimento e outros a relação água-aglomerante. As resistências à compressão das argamassas com resíduo, quando

comparadas às argamassas de referência (sem resíduo), mostraram desempenho superior nas idades de 63 dias e 91 dias, apontando o resíduo como uma boa alternativa.

Rodier e Savastano Jr. (2018) verificaram a incorporação de resíduo de vidro para a elaboração de materiais cimentícios eco-eficientes. Eles realizaram a substituição parcial de 10% em massa de cimento por resíduo de vidro em um traço de argamassa. Ao executar ensaios de compressão simples na argamassa modificada foram obtidas resistências 11% superiores às da argamassa de referência na idade de 28 dias e foram atingidas as especificações de resistência da norma americana.

Shao *et al* (2000) estudaram o uso do vidro finamente moído e cinzas volantes no concreto em substituição ao cimento, adicionados em proporções de até 30% em massa. As adições foram realizadas com diferentes dimensões das partículas de vidro. Os autores verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro finamente moído ($< 75 \mu\text{m}$) tinha suas propriedades mecânicas melhoradas em função de reações pozolânicas.

Quanto ao uso de resíduo de vidro como mistura no solo, atualmente existem poucos estudos sobre o assunto, os quais serão abordados na seção 2.2 a seguir, junto com outros métodos de melhoria de solos.

2.2 Melhoria de solos

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade, melhorando, assim, seu desempenho (CASAGRANDE, 2001).

Alguns métodos de reforço ou melhoria de solos são permanentes, outros são temporários. Entre os métodos temporários está o congelamento de solos, que é aplicado em ambientes onde o solo é fragilizado pela presença de água. Este processo consiste na aplicação de nitrogênio líquido ou cloreto de cálcio que congelam a água presente no solo, enrijecendo o terreno. (LEAL, 2003)

Os métodos permanentes podem contar ou não com a adição de outros compostos. Entre os métodos sem adição pode-se citar a compactação de camadas de

solo, que é feita retirando o solo e recolocando-o em camadas que vão sendo compactadas por rolos compressores.

Um outro modo de usar a compactação para melhoria do solo é o de colunas de solo tratado, que é uma alternativa às colunas de areia ou brita. As estacas granulares, de acordo com Passos (2005), tem como princípio de funcionamento o deslocamento do solo natural, que ocorre através da introdução de materiais granulares compactados em alguns pontos específicos, possuindo, de forma geral, o formato de cilindros irregulares (assim como as estacas clássicas) o que traz melhoria nas propriedades do solo em questão como aumento na capacidade de carga e redução nos recalques.

Freitas (2016) realizou um estudo para reforço de solos com estacas de solo laterítico para a execução de fundações rasas. Baseado em resultados preliminares de prova de carga em placa realizados no terreno com e sem reforço, o autor concluiu que a técnica de melhoramento do solo avaliada é eficiente para a redução de recalque em solo colapsível. Além disso, o autor obteve uma tensão de ruptura maior para as colunas de solo compactado do que para as colunas de solo e brita, o que confirma a maior eficiência deste método de reforço.

Métodos que incluem aditivos são muito comuns, como por exemplo, a mistura solo-cal. A adição de cal ao solo altera suas propriedades físicas, apresentando melhorias na plasticidade, trabalhabilidade, resistência, relação tensão-deformação e fadiga. Lovato (2004) realizou um estudo no qual utilizou este método de melhoria e obteve um aumento de resistência à compressão simples proporcional ao teor de cal. Como a cal é um material cimentício os resultados variam de acordo com o tipo e teor de cal, tipo de solo, energia de compactação e período e condições de cura.

Um método utilizado em alguns estudos concomitantemente à adição de cal é a adição de cinzas volantes ao solo. Na presença de água ocorrem reações pozolânicas entre estes compostos, gerando aglomerantes. Pinto (1971) pesquisou a adição desses materiais ao solo. A proporção de cal foi utilizada pelo pesquisador foi fixada em 6%, já a de cinzas volantes foi testada nos teores de 10, 17,5 e 25%. O autor concluiu em sua pesquisa que a resistência aumentava proporcionalmente ao teor de cinzas volantes no solo. O emprego desse material gera também vantagens ambientais, visto que ele deixa de ser depositado em aterros ao receber uma funcionalidade.

Outro método de estabilização de solos que ocorre com a inclusão de aditivos é a mistura solo-cimento, que já vem sendo utilizada há décadas. Para Collarte-Concha (1986) *apud* Macêdo (2004), a estabilização com cimento é um processo químico, pois se processam reações químicas do cimento hidratado, no qual são desenvolvidos vínculos químicos entre a superfície do grão de cimento hidratado e a parte da partícula de solo que contata esse grão de cimento. Nas pesquisas realizadas por Macêdo (2004) com a adição de cimento CP II E-32 ao solo nas proporções de 1%, 3%, 5%, 7%, e 11% notou-se um aumento satisfatório da resistência à compressão simples para a aplicação da mistura na estrutura de pavimentos asfálticos, observando-se que com apenas 1 e 3% já se observaram bons resultados.

Os métodos supracitados incluem a ocorrência de reações químicas, entretanto, há métodos de melhoria de solos com incorporação de outros materiais, que contam apenas com interações físicas. Pode-se citar entre estes métodos a incorporação de fibras ao solo. Estas aumentam a resistência do solo e controlam a propagação de fissuras devido à melhoria na resistência à tração. As fibras incorporadas no solo podem ser metálicas, minerais, poliméricas e naturais. Sotomayor (2014) estudou a incorporação de fibras naturais ao solo arenoso, optando pela utilização de fibras de coco. O autor obteve como resultados a melhoria do comportamento carga-recalque e da resistência ao cisalhamento do solo.

Casagrande (2001) também verificou a incorporação de fibras no solo, entretanto, utilizou fibras de polipropileno. Em seus estudos ele pôde observar que para o solo reforçado se observa um crescimento constante de resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Além de conceder maior resistência ao solo, as fibras apresentam uma maior mobilização quanto maior for a deformação imposta ao material reforçado. O autor percebeu também que a resistência sofre um aumento proporcional ao aumento do teor de fibras. Este estudo objetivou a aplicação do solo reforçado em bases de fundações superficiais, obtendo resultados positivos.

Apesar das diversas alternativas de melhoria de solos já conhecidas e disponíveis para serem empregadas, existem possibilidades que apresentam também vantagens ambientais, como o emprego das cinzas volantes citado anteriormente. Este também é o caso de métodos de melhoria de solo decorrentes de misturas de resíduos de construção

e demolição (RCD). O RCD vem sendo estudados principalmente para servir como reforço em base e sub-base de pavimentos asfálticos. Guedes e Júnior (2016) realizaram estudos misturando teores de 15, 30 e 45% em massa de agregados reciclados (constituídos por RCD) em um solo caracterizado como areia argilosa, obtendo resultados positivos na resistência à compressão simples para as misturas com 15 e 30% de material, aumentando este fator.

Winter (2018) verificou a incorporação de cal de carbureto e resíduo de vidro dois tipos de solos arenosos, sendo o resíduo de vidro adicionado nos teores de 10, 20 e 30% e a cal de carbureto em 3, 5 e 7%. O resíduo de vidro utilizado foi obtido pela moagem do descarte de vidros planos utilizados na fabricação de janelas em uma vidraçaria. A moagem foi realizada em etapas até que o material fosse passante na peneira de número 200, podendo ser classificado como pó. Verificou-se neste estudo um aumento de resistência proporcional à quantidade de vidro e de cal de carbureto adicionados, quanto maior o teor maior foi a resistência a compressão dentro da faixa de valores utilizada na pesquisa. A distribuição granulométrica dos materiais utilizados pode ser vista na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica dos materiais utilizados nos estudos de Winter

Fração / Material	Areia de Osório	Arenito de Botucatu	Cal de Carbureto	Pó de vidro
% Pedregulho ($d > 2$ mm)	0	0	0	0
% de Areia Grossa ($0,6 < d < 2$ mm)	0	0	0	0
% de Areia Média ($0,2 < d < 0,6$ mm)	42	16	0	0
% de Areia fina ($0,06 < d < 0,2$ mm)	53	43	12	0,5
% de Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm)	4	33	82	93,5
% de Argila ($d < 0,002$ mm)	1	5	6	6,2

Fonte: Adaptado de Winter (2018).

Olufowobi et al. (2014) misturou resíduo de vidro a um solo nas proporções de 1%, 2%, 5%, 10% e 15% além de 15% de cimento, em massa. O solo utilizado tinha 28% das partículas com diâmetros característicos de um silte e 72% de uma areia. O resíduo de vidro utilizado foi proveniente da moagem de embalagens de refrigerante, que foram lavadas, secadas e moídas até que o material fosse passante na peneira de número 400, sendo menores que 0,038 mm e caracterizando o material como pó. Nos ensaios de compactação realizados houve um aumento da massa específica seca do solo

até a proporção de 5% de resíduo de vidro, havendo queda contínua nas proporções de 10 e 15%. A umidade ótima das misturas caiu proporcionalmente ao aumento de resíduo de vidro. Além disso, notou-se melhoras significativas nas propriedades mecânicas de solo, principalmente na adição de 5 a 10% de resíduo de vidro relativa à massa de solo.

Por fim, Benny *et al.* (2017) adicionou resíduo (ou pó) de vidro, com diâmetro das partículas menor que 0,075 mm, nas proporções de 2, 4, 6, 8 e 10% a um solo silto-argiloso para analisar as melhorias geradas. O solo utilizado possui granulometria constituída 4% por areia grossa, 8% por areia média, 2% por areia fina, 50% por silte e 36% por argila. Os resultados obtidos nos ensaios de compressão melhoraram proporcionalmente ao teor do material utilizado. No ensaio de CBR, os resultados foram melhorando até o teor de 6% de resíduo de vidro, havendo queda após este valor. O resíduo de vidro utilizado na pesquisa foi produto do processamento de vidros de garrafas e janelas.

Os resultados gerados pelos estudos acima são semelhantes ao que se espera do uso do resíduo de vidro no teor de 15%, que neste trabalho é analisado como adição ao solo prevendo-se sua aplicação como reforço para fundações rasas, a exemplo dos trabalhos de Casagrande (2001) e Freitas (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Características do resíduo de vidro

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. O material foi coletado na empresa Vitral, localizada no Distrito Industrial da cidade de Uberlândia – MG, que fornece vidros planos em variadas formas, tamanhos e utilizações para várias vidraçarias da cidade.

No processo de polimento da empresa, são utilizadas brocas diamantadas para lapidar as bordas das peças de vidro. Ao realizar esse procedimento há uma elevação considerável de temperatura que pode causar trincas na peça de vidro, sendo necessária a utilização de água para resfria-la.

Na Vitral, o resíduo de vidro é levado em suspensão na água, por gravidade, para tanques de passagem (Figura 1), de onde a suspensão é bombeada para a estação de tratamento da própria empresa. No tratamento, o resíduo é separado da água, com a utilização de um floculante e de um neutralizador que controla o pH da água para garantir a eficácia do produto, a composição de ambos não foi disponibilizada pela empresa. Após a separação o resíduo é armazenado em bolsões (*bags*) ilustrados na Figura 2, que também servem como uma espécie de filtro para separar o material granular da água restante. Posteriormente, o material segue para o aterro sanitário, não se aplicando à reciclagem, pois não é feita a separação dos tipos de vidro no processo. Apenas na empresa Vitral, onde foi coletado o material, são gerados em média 3 *bags* por mês, correspondendo a aproximadamente 3 toneladas de material.

O material coletado para a pesquisa foi retirado do tanque de passagem da água com resíduo de vidro em suspensão (visto na Figura 1) e armazenado em um balde, que continha resíduo de vidro e água. Este material foi levado para o laboratório de mecânica dos solos onde foi transferido para uma bandeja e parcialmente separado da água para a secagem. Ao final da secagem, foram obtidos torrões de material, cujo aspecto pode ser visto nas Figuras 3 (a) e (b). Os torrões foram desfeitos com o auxílio de um almofariz e um pistilo.

Figura 1- Tanque de passagem da água com resíduo de vidro em suspensão



Fonte: Autor (2018).

Figura 2 - Bolsões de armazenamento do resíduo de vidro



Fonte: Autor (2018).

Figura 3 - (a) Resíduo de Vidro Úmido e (b) Resíduo de Vidro Seco



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Após ser destorroado, o material foi pesado e optou-se por passa-lo na peneira com abertura de 2 mm, para evitar que fragmentos grandes pudessem provocar ferimentos no seu manuseio. O aspecto final do pó pode ser observado na Figura 4. A amostra de resíduo de vidro coletada na empresa tinha 6582,8 g, tendo uma porcentagem de 10,67% retida na peneira citada, o que corresponde a 702,6 g. O material retido na peneira com abertura de 2 mm foi descartado e o restante foi passado duas vezes no repartidor de amostras, apenas para homogeneização, e armazenado em sacos plásticos para ser utilizado nos ensaios.

Figura 4- Resíduo de Vidro



Fonte: Autor (2018).

Assim que a amostra foi preparada nas condições ideais para que pudesse ser empregada nos experimentos, ela foi caracterizada, sendo obtida a massa específica dos seus grãos e sua curva granulométrica de acordo com os procedimentos descritos nos itens 3.1.1 e 3.1.2. É importante ressaltar que no local onde o resíduo de vidro foi coletado ainda não havia sido aplicado defloculante, havendo apenas água misturada a ele, ou seja, o resíduo não possui nenhum tipo de contaminação.

3.1.1 Massa específica dos grãos

O ensaio normatizado pela ABNT NBR 6458:2016, busca determinar o valor da massa específica dos sólidos passantes na peneira de abertura 4,8 mm. Como a amostra foi preparada buscando utilizar apenas os grãos passantes na peneira com abertura de 2 mm não houve a necessidade de um novo peneiramento.

Devido às características visuais do resíduo de vidro preparado, o material foi associado à areia para a realização do ensaio. Sendo assim, foram tomadas 120,29 g

para o experimento. A amostra tomada para o ensaio foi imersa em água destilada por um prazo de aproximadamente 24 horas e depois levada para o copo dispersor, que foi completado com água destilada até aproximadamente a metade do seu volume. Foi tomada também uma quantidade de amostra para a determinação do teor de umidade do material conforme o processo descrito pela ABNT NBR 6457:2016.

O processo de dispersão durou 15 minutos e quando finalizado o material foi colocado no picnômetro, que foi preenchido com água em três parcelas nas quais foi aplicado vácuo de 15 minutos nas duas primeiras com agitação do material em medidas de tempo regulares. O procedimento de dispersão e aplicação do vácuo podem ser vistos na Figura 5.

Figura 5 - Ensaio de determinação da massa específica dos grãos



Fonte: Autor (2018).

Após o procedimento descrito, o conjunto picnômetro-solo-água foi pesado, sendo obtida a massa M_2 e sua temperatura T foi verificada para que fosse calculada a massa específica dos grãos pela seguinte equação:

$$\delta = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + h)}{[M_1 \cdot 100 / (100 + h)] + M_3 - M_2} \cdot \delta_T \quad (Eq. 1)$$

Sendo:

δ = Massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

M_1 = Massa do solo úmido (g);

M_2 = Massa do conjunto picnômetro-solo-água, na temperatura T de ensaio (g);

M_3 = Massa do conjunto picnômetro-água, na temperatura T de ensaio (g);

h = umidade inicial da amostra (%); e

δ_T = Massa específica da água, na temperatura T de ensaio (g/cm³).

3.1.2 Granulometria

A ABNT NBR 7181:2016 estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. O peneiramento é dividido em dois: o peneiramento grosso, que engloba as peneiras com abertura de 50 a 2,0 mm e o peneiramento fino, que engloba as peneiras com abertura de 1,2 a 0,075 mm. O material utilizado no peneiramento grosso é aquele que ficar retido na peneira com abertura de 2 mm, como este material não será utilizado em nenhum experimento, esta etapa não foi realizada.

Com o material passante na peneira com abertura de 2 mm foi realizada primeiramente a sedimentação e depois o peneiramento fino. No ensaio de sedimentação a amostra ficou imersa em uma solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1000 cm³ de solução. Como não era conhecido se o resíduo de vidro poderia reagir com a solução foram feitos dois ensaios, um no qual esta solução defloculante foi utilizada e outro no qual ela foi substituída por água destilada para comparação dos resultados.

Do material preparado conforme o que foi descrito no item 3.1 foram tomados 120,16 g de resíduo de vidro para o ensaio de sedimentação com a solução (amostra 1), 120,50 g para o experimento com água destilada (amostra 2), sendo que a ABNT NBR 7181:2016 prevê aproximadamente 120 gramas para areias e 51,26 g para a determinação da umidade de acordo com o procedimento descrito pela ABNT NBR 6457:2016.

As amostras preparadas para os ensaios de sedimentação foram deixadas imersas na solução de hexametáfosfato de sódio e na água destilada por aproximadamente 24 horas, ambas ficaram imersas no volume de 125 cm³. Após o tempo de imersão as amostras foram transferidas para o dispersor, onde foram agitadas durante 15 minutos.

Terminado o tempo de agitação, os materiais foram colocados em provetas, e o volume foi completado até 1000 cm³ com água destilada (Figura 6). Após a transferência as provetas foram agitadas para que o resíduo de vidro ficasse em suspensão e se iniciaram as leituras no densímetro calibrado e da temperatura.

Inicialmente, foram feitas apenas leituras no densímetro calibrado aos 0,5, 1, 2 e 4 minutos. Posteriormente as leituras do densímetro foram feitas juntamente com as de temperatura das suspensões aos 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 6 - Ensaio de Sedimentação



Fonte: Autor (2018).

O densímetro e o termômetro eram sempre retirados e colocados cuidadosamente em cada solução a cada leitura, para que o material em suspensão não se depositasse sobre o densímetro e alterasse as leituras e para que a temperatura não sofresse alteração devido a uma agitação excessiva da solução.

Ao terminar os ensaios, a próxima etapa foi calcular o diâmetro das partículas que se sedimentaram em cada leitura, este cálculo é realizado empregando a Lei de Stokes, que está expressa na Equação 2.

$$D_i = 0,00553 \sqrt{\frac{\mu}{(\rho_s - 1)} \cdot \frac{z}{t}} \quad (Eq. 2)$$

Na qual:

D_i = Diâmetro equivalente da partícula (mm);

ρ_s = Massa específica das partículas menores que 2,0 mm (g/cm³);

z = Distância entre o centro de volume do bulbo do densímetro e a superfície da suspensão (cm); e

μ = Viscosidade dinâmica da água em função da temperatura T (10⁻⁴ Pa.s).

O valor da viscosidade dinâmica é dado pela Equação 3.

$$\mu = \frac{17,756}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} \quad (Eq. 3)$$

A construção da curva granulométrica é dada através do tamanho dos grãos e a porcentagem de grãos que se enquadra em cada faixa. A porcentagem de partículas com diâmetro menor a D_i é dada pela Equação 4.

$$P < D_i(\%) = \left(\frac{100}{M_s} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \right) \times (l + l_{sol}) \quad (Eq. 4)$$

Na qual:

M_s = Massa de sólidos na suspensão (g);

ρ_s = Massa específica dos grãos (g/cm³);

l = leitura de densidade da suspensão (g/cm³); e

l_{sol} = leitura de densidade na água com defloculante à mesma temperatura T da suspensão (g/cm³).

O valor da leitura de densidade na água com defloculante à mesma temperatura T da suspensão (l_{sol}) e o da distância entre o centro de volume do bulbo do densímetro e a superfície da suspensão (z) foram obtidos de acordo com a calibração do densímetro utilizado, que possui curvas de calibração que se comportam conforme as Equações 5 e 6.

$$z = -0,1983l + 18,7492 \quad (Eq. 5)$$

$$l_{sol} = -0,00002T^3 + 0,0079T^2 - 0,1039T - 4,6746 \quad (Eq. 6)$$

Após o ensaio de sedimentação, foi realizado o peneiramento fino. O material de cada proveta (com e sem defloculante) foi passado na peneira de abertura 0,075 mm e lavado, até que toda a parcela passante na peneira fosse retirada. O resíduo de vidro restante foi, então, levado para a secagem na estufa, onde permaneceu por 24 horas.

Com o material seco, foi realizado o peneiramento fino. Para o ensaio foram utilizadas as peneiras com abertura de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm, que foram agitadas por um agitador mecânico durante 15 minutos. Foram então realizados os cálculos relativos à porcentagem passante em cada peneira através das Equações 7 e 8. Para os cálculos dos percentuais considerou-se que foi colocada nas peneiras a quantidade de massa seca que foi utilizada no ensaio de sedimentação.

$$P_r(\#_i) = \frac{M_s(\#_i)}{M_s} \cdot 100\% \quad (Eq. 7)$$

$$P_p(\#_i) = 100\% - P_r(\#_i) \quad (Eq. 8)$$

Nas quais:

$P_r(\#_i)$ = Porcentagem retida na peneira i (%);

$P_p(\#_i)$ = Porcentagem que passa na peneira i (%);

$M_s(\#_i)$ = Massa de sólidos retidos na peneira i (g); e

M_s = Massa de sólidos da amostra (g).

3.2 Características do solo

A amostra de solo utilizada na pesquisa foi coletada no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia. A retirada do solo foi feita com auxílio de um trator agrícola que possuía um trado tipo rosca sem fim de 250 mm de diâmetro com capacidade de perfuração de até 1,50 m de profundidade (Figura 7). A coleta foi feita pelo aluno Felipe Maraschine Almeida. De acordo com Almeida (2017), foram coletados cerca de 100 kg de material argiloso deformado com umidade média de 32%. Além disso, o material se apresentava bastante compacto e resistente durante extração pelo trator.

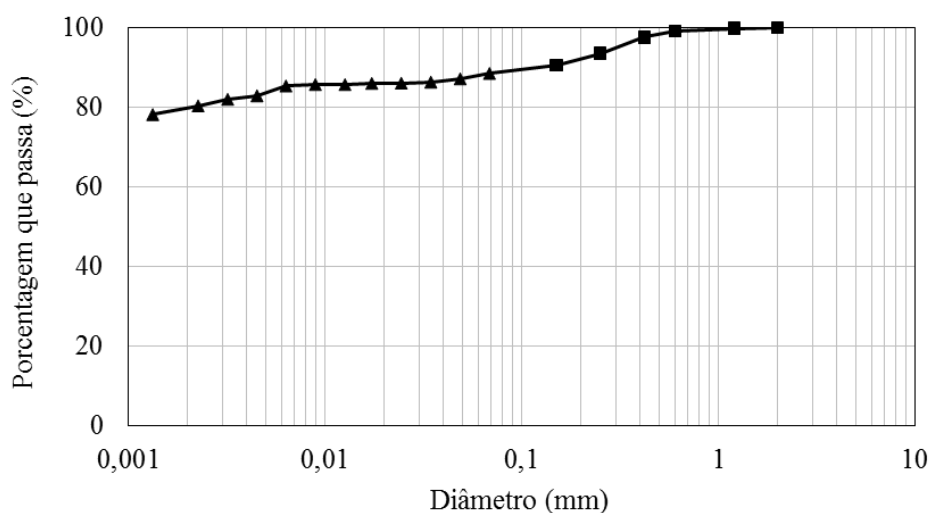
Figura 7 - Coleta da amostra no Campus Glória



Fonte: Almeida (2017).

Após a coleta da amostra, Almeida (2017) realizou os ensaios de caracterização do solo e curva de compactação. Tais ensaios seguiram orientações normativas e os resultados serão usados neste trabalho. Foram obtidos pelo autor: massa específica dos sólidos foi de $2,385 \text{ g/cm}^3$, limite de liquidez de 74% e limite de plasticidade 42%. A curva granulométrica pode ser vista na Figura 8, na qual se nota que o solo é composto predominantemente por argila e silte.

Figura 8 - Curva Granulométrica do Solo do Campus Glória

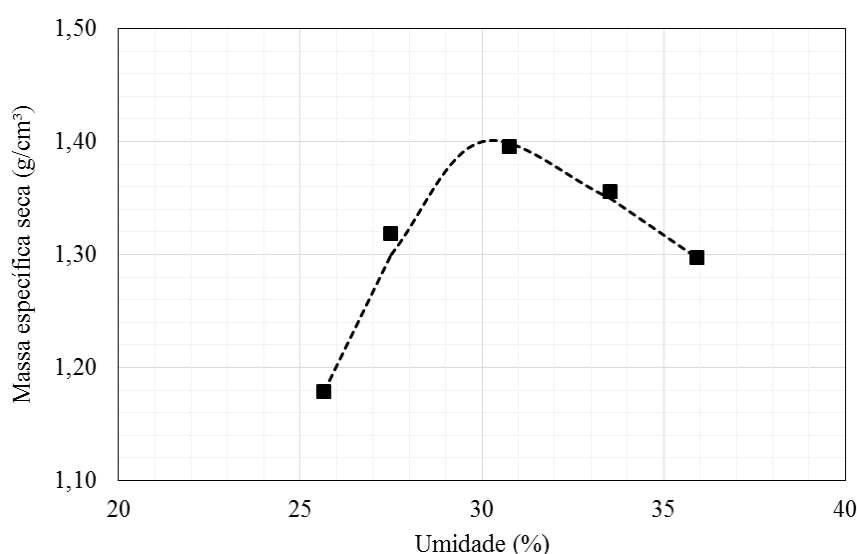


Fonte: Adaptado de Almeida (2017).

Com os dados obtidos, Almeida (2017) classificou o solo de acordo com a Classificação Unificada e com a Classificação TRB. Na Classificação Unificada o solo foi caracterizado como MH, que significa que se trata de um silte de alta compressibilidade, ainda que a curva granulométrica indique a predominância da fração argila. Já na Classificação TRB o solo foi enquadrado na categoria A-7-5, que o indica como um solo fraco ou pobre para subleito.

Almeida (2017) realizou ensaios de compactação no solo em questão com energias variadas. O ensaio de interesse do presente trabalho foi realizado sem reuso de solo, com energia de compactação normal e com o cilindro pequeno (1000 cm^3). A curva de compactação obtida pelo autor para tais condições pode ser vista na Figura 9. Através desta pode-se inferir que a umidade ótima do solo é 30% e sua massa específica seca é de $1,40 \text{ g/cm}^3$.

Figura 9 - Curva de Compactação Campus Glória

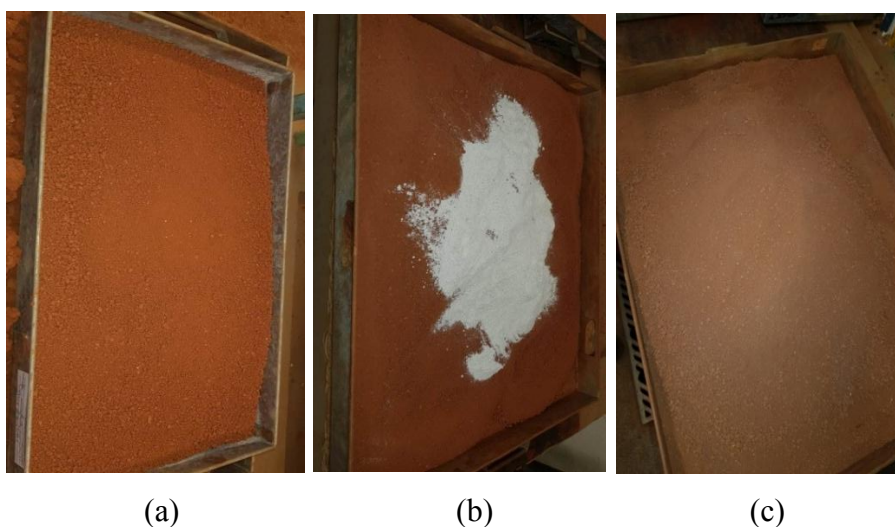


Fonte: Adaptado de Almeida (2017).

3.3 Adição de resíduo de vidro ao solo

Neste estudo da adição de resíduo de vidro ao solo, optou-se por uma proporção de 15% de pó em relação à massa de solo, tendo como base o valor intermediário dos estudos realizados por Ribeiro (2015) que misturou o material em argamassas. A mistura foi preparada para cada experimento conforme houve necessidade de material, sendo sempre passada em um repartidor de amostras duas vezes a fim de aumentar a homogeneização do material. Os aspectos do solo em seu estado natural, do resíduo de vidro e da mistura, podem ser vistos nas Figuras 10 – (a), (b) e (c).

Figura 10 - (a) Solo no estado natural, (b) Solo e vidro, (c) Mistura de solo e vidro



Fonte: Autor (2018).

3.3.1 Compactação

O processo realizado para o ensaio de compactação da mistura foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7182:2016, seguindo os mesmos padrões descritos no item 3.2.4. No caso da mistura, foi feita uma tentativa inicial de realizar o ensaio com reuso, visando economia de material, e posteriormente foi realizado o ensaio sem reuso.

No ensaio realizado com reuso, após a retirada do corpo de prova do cilindro pelo extrator de amostras o material foi destorroadado de forma a ser passante na peneira com abertura de 4,8 mm, a umidade foi aumentada para a compactação do ponto seguinte, e o processo de moldagem de um novo corpo de prova realizado. Conforme a umidade do ensaio foi aumentando, o material apresentou dificuldades de ser destorroadado, apresentando o aspecto que pode ser visto na Figura 11. Além disso, conforme o solo ia sendo reutilizado, sua compactação tornava-se difícil e ele se apresentava muito mole. Devido às dificuldades encontradas, este ensaio não apresentou bons resultados.

Optou-se então por refazer o ensaio da mistura sem reuso, no qual foram moldados 9 corpos de prova. A sequência de processos realizados para a compactação da amostra pode ser vista na Figura 12.

Figura 11 - Destorroadamento do solo para ensaio com reuso



Fonte: Autor (2018).

Figura 12 - Ensaio de compactação da mistura solo e vidro



Fonte: Autor (2018).

3.3.2 *Compressão simples*

Para o ensaio de compressão simples foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 12770:1992. Foram moldados corpos de prova na umidade ótima, controlando-se a massa de solo ou mistura para que o corpo de prova atingisse a respectiva massa específica seca máxima.

Na preparação da amostra para moldagem de cada corpo de prova foi tomada uma quantidade de solo (ou mistura) de aproximadamente 400 g, com umidade conhecida, que possibilitou o cálculo da quantidade de água a ser adicionada para a preparação da amostra na umidade ótima. Assim que a água foi adicionada e foi feita a homogeneização de cada amostra, foi retirada uma parcela para a determinação da umidade final.

Estipulou-se que a altura do corpo de prova seria de 10 cm, pois o diâmetro do molde era de 5,01 cm. Para a moldagem, a massa necessária foi dividida em 3 partes iguais, para que o processo fosse executado em 3 camadas. Cada camada foi compactada com controle da altura e a superfície de contato entre camadas consecutivas foi escarificada para que tivessem uma boa aderência entre si.

Retirando o corpo de prova do molde, este era pesado e suas dimensões finais (diâmetro e altura) eram medidos com o paquímetro para o cálculo do volume e massa específica reais. Feita a caracterização do corpo de prova, ele era levado para a prensa de compressão e o ensaio era realizado a uma velocidade de deformação de 0,88%/min. Durante o ensaio eram lidos o deslocamento axial e a força em um extensômetro e um

anel dinamométrico, respectivamente. As leituras foram realizadas a cada 20 segundos, até que a resistência do solo ficasse reduzida a um valor equivalente à metade da máxima resistência observada.

3.3.3 Índice de suporte Califórnia

Normatizado pela ABNT NBR 9895:2016, o ensaio foi realizado com o objetivo de analisar as alterações na capacidade de carga do solo. Foi moldado um corpo de prova para o solo natural e um para a mistura de solo com o vidro. Para realizar a compactação do solo foram utilizadas a umidade ótima e massa específica do solo natural e da mistura, e o cilindro e soquete grandes. Diante disto, a moldagem foi feita em 5 camadas e 12 golpes por camada, conforme especificado pela norma.

Posteriormente à moldagem foi feita a imersão dos corpos de prova em água para o ensaio de expansão e para que o CBR fosse realizado com o solo saturado. Enquanto ficaram imersos, os corpos de prova estiveram submetidos a uma carga constante de 4540 g (estando dentro do intervalo estabelecido pela norma) com o objetivo de simular o comportamento de um subleito de pavimento estando confinado e saturado. Além das cargas, foi montado um extensômetro sobre o corpo de prova, como pode ser visto na Figura 13, para que fossem realizadas leituras de 24 em 24 horas durante 96 horas e a expansão fosse calculada.

Figura 13 - Ensaio de Expansão (a) Solo Natural (b) Mistura Solo-Vidro



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

O cálculo foi realizado fazendo-se a divisão da leitura final menos a leitura inicial do extensômetro pela altura inicial do corpo de prova. O resultado foi expresso em porcentagem.

Após as 96 horas, os cilindros foram retirados do tanque no qual estavam imersos, o excesso de água foi retirado, deixando os corpos de prova em ambiente seco durante 15 minutos. Os corpos de prova foram então levados para a prensa na qual foi realizado o ensaio de CBR, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de CBR



Fonte: Autor (2018).

Durante o ensaio permaneceu a sobrecarga sobre o solo e fez-se leituras nos dois extensômetros que podem ser vistos na Figura 15. No extensômetro acoplado ao anel dinamométrico foram feitas as leituras que serão utilizadas no cálculo da força de penetração com precisão de 0,001 mm, enquanto no acoplado ao prato de apoio do cilindro foram feitas leituras referentes ao deslocamento com precisão de 0,01 mm.

À medida que o prato ia se deslocando em direção ao anel o pistão penetrava o solo que oferecia resistência e comprimia o anel, causando uma variação um deslocamento que podia ser observada e lida no extensômetro. Foram feitas 17 leituras, de 30 em 30 segundos até os 4 primeiros minutos de ensaio, e a cada 1 minuto do 4º ao 12º minuto de ensaio.

De acordo com a ABNT NBR 9895:2016, o valor do CBR é o maior valor, em porcentagem, entre a relação das pressões do ensaio e da amostra de brita padrão – 6,90 e 10,35 MPa para as respectivas penetrações de 2,54 e 5,08 mm, como na Equação 12.

$$CBR = \text{MAIOR} (CBR_{2,54}; CBR_{5,08}) \quad (Eq. 12)$$

$$CBR_{2,54} = \frac{\text{Pressão calculada ou corrigida}}{6,90} \times 100\% \quad (Eq. 12')$$

$$CBR_{5,08} = \frac{\text{Pressão calculada ou corrigida}}{10,35} \times 100\% \quad (Eq. 12'')$$

Nas quais:

$CBR_{2,54}$ = Valor do CBR para a penetração de 2,54 mm (%);

$CBR_{5,08}$ = Valor do CBR para a penetração de 5,08 mm (%);

CBR = Maior valor entre $CBR_{2,54}$ e $CBR_{5,08}$ (%);

Pressão calculada = Pressão obtida pela curva do CBR (MPa);

Pressão corrigida = caso haja inflexão no gráfico corrigir o valor da pressão ao somar 'c' à penetração de 2,54 ou 5,08mm (MPa);

c = Valor encontrado no eixo das abcissas do gráfico ao traçar uma tangente no ponto de inflexão da curva do CBR (mm).

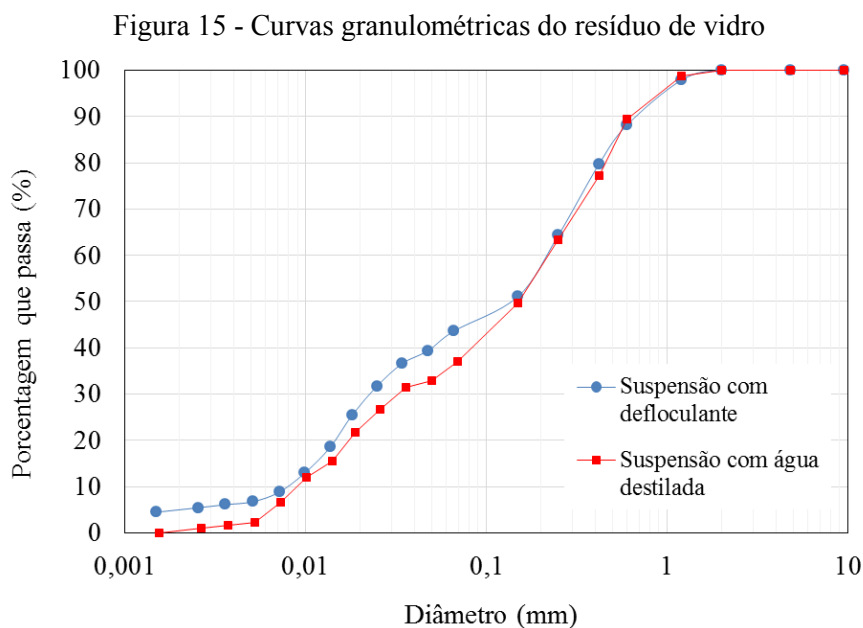
4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Massa específica dos grãos e granulometria do resíduo

Diante dos experimentos realizados, o primeiro parâmetro de comparação obtido entre o solo e a amostra de resíduo de vidro foi a massa específica de grãos. Para o solo, Almeida (2017) encontrou um valor de $\delta = 2,385 \text{ g/cm}^3$, enquanto para o resíduo de vidro o valor foi igual a $\delta = 2,523 \text{ g/cm}^3$, sendo 5,79% maior que a massa específica dos grãos do solo. O valor encontrado para o resíduo de vidro também é semelhante ao obtido por Winter (2018), de $2,44 \text{ g/cm}^3$, embora o autor tenha usado o material com uma granulometria mais fina em sua pesquisa.

Como descrito no item 3.1.2, foram feitos dois ensaios para a determinação da curva granulométrica do resíduo de vidro. Estes ensaios se diferiram na etapa da sedimentação que foi realizada com e sem a solução defloculante.

As curvas granulométricas geradas pelos ensaios estão ilustradas na Figura 15.



Fonte: Autor (2018).

De acordo com o observado nas curvas granulométricas, é improvável que tenha ocorrido alguma reação química entre o resíduo de vidro e a solução de hexametáfosfato de sódio, pois os resultados foram parecidos. Pode-se notar também que a influência maior do defloculante se deu nas partículas mais finas, não havendo praticamente

nenhuma diferença nas frações mais grossas. Sendo assim, optou-se por considerar os resultados da amostra cujo ensaio foi feito no meio de dispersão citado pela norma.

Os resultados de composição do material observados nas curvas granulométricas, se comparados às faixas granulométricas de solos, indicam predominância de areia média e silte, diferentemente da amostra de solo com qual a mistura foi feita, que como pode ser visto na Figura 8, é composto predominantemente por argila. As composições granulométricas do solo e do resíduo de vidro estão na tabela 2.

Tabela 2 - Composição granulométrica dos materiais

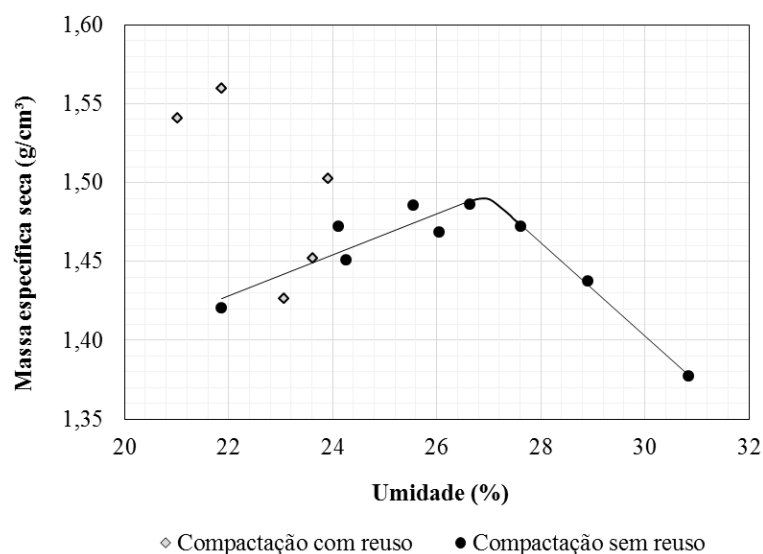
Fração granulométrica	Porcentagem no solo (%)	Porcentagem no resíduo de vidro (%)
Areia grossa	1	12
Areia média	7	30
Areia fina	4	16
Silte	7	37
Argila	81	5

Fonte: Autor (2018).

4.2 Compactação da mistura

Como foi descrito no item 3.3.1, foram realizados dois ensaios de compactação na mistura. Primeiramente o ensaio foi realizado com reuso de material, entretanto, os pontos ensaiados não tiveram um comportamento regular, ficando dispersos e impossibilitando uma análise da compactação. Diante disto, foi realizado o ensaio sem reuso de material que gerou uma curva com o comportamento esperado, permitindo uma análise coerente dos resultados. Pôde-se perceber pelos dados do segundo ensaio um valor de 27% para umidade ótima e 1,49 g/cm³ para a massa específica seca. A comparação dos resultados obtidos nos dois ensaios pode ser vista na Figura 16.

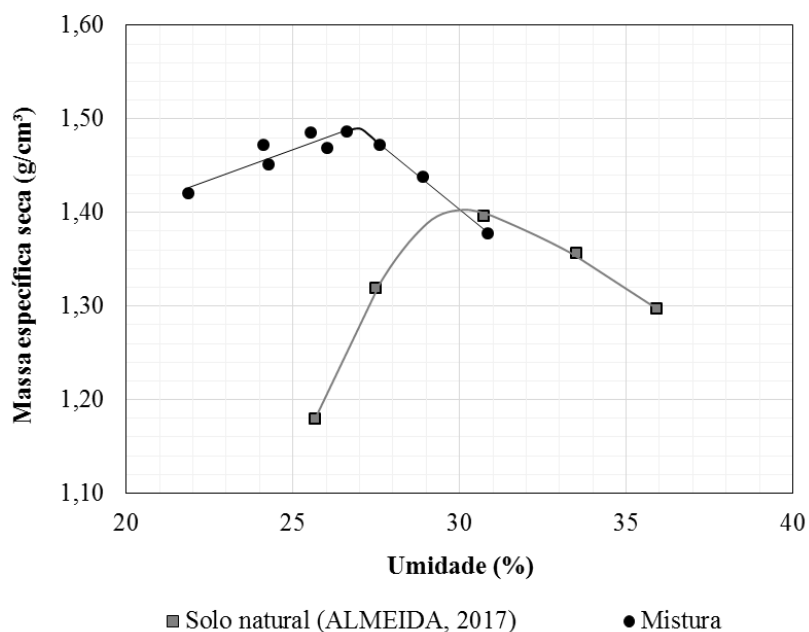
Figura 16 - Ensaios de compactação da mistura (com e sem reuso)



Fonte: Autor (2018).

Solos arenosos, quando comparados a solos argilosos, possuem massa específica seca maior e umidade ótima de compactação menor. Quando foi feita a mistura do resíduo de vidro, que tem características mais próximas às areias, com o solo do Campus Glória, que tem composição predominantemente argilosa, o esperado era que a umidade ótima da mistura fosse menor que a do solo e a massa específica seca fosse maior. Estas expectativas foram correspondidas e podem ser visualizadas nas curvas de compactação expressas na Figura 17.

Figura 17 - Ensaios de Compactação do Solo e da Mistura Solo-Vidro



Fonte: Autor (2018).

Comparando os resultados, ao realizar a mistura contendo 15% de resíduo de vidro em massa, houve uma redução de 3% na umidade ótima e um aumento de 6,43% na massa específica seca em relação às características do solo natural.

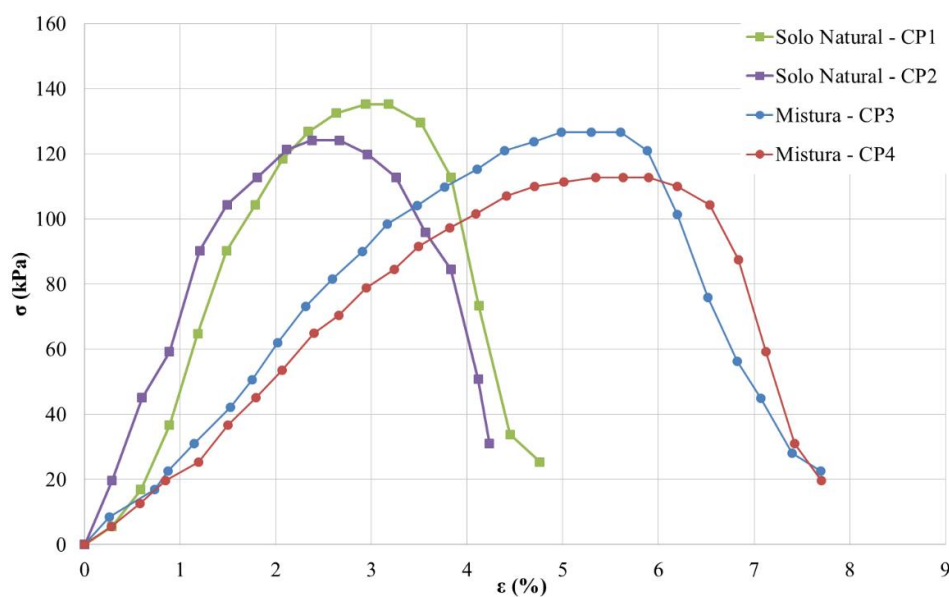
Benny *et al* (2017), pesquisou a adição de pó de vidro com granulometria mais fina a um solo com granulometria mais grossa que os estudados neste trabalho. O solo pesquisado pelo autor possuía $\delta = 1,464 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima igual a 34% em seu estado natural. No estudo realizado pelo autor, o valor da massa específica seca aumentou até o teor de 6% de adição de pó de vidro, sofrendo queda nos valores de 8 e 10%, enquanto o valor da umidade ótima decresceu conforme o teor de resíduo (ou pó) de vidro aumentava.

Comparando os resultados desta pesquisa aos do autor supracitado, a queda da umidade ótima correspondeu às expectativas, mas o aumento da massa específica seguiu um padrão diferente do que foi encontrado pelo autor.

4.3 Compressão simples da mistura

A partir dos dados obtidos no ensaio de compactação foi possível a moldagem dos corpos de prova para realização do ensaio de compressão simples nas condições ideais do solo. Foram realizados ensaios em 2 corpos de prova de solo natural e 2 corpos de prova da mistura. Estes estão ilustrados na Figura 18.

Figura 18 - Compressão simples em amostras de solo e mistura de solo e resíduo de vidro



Fonte: Autor (2018).

Pelo gráfico têm-se os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade tangente expostos na tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de compressão simples

Corpo de prova	Máxima tensão (kPa)	Coesão não drenada (kPa)	Módulo tangente (MPa)
CP1 - Solo Natural	136	68	6,080
CP2 - Solo Natural	124	62	7,499
CP3 - Mistura	127	64	3,097
CP4 - Mistura	113	57	2,612

Fonte: Autor (2018).

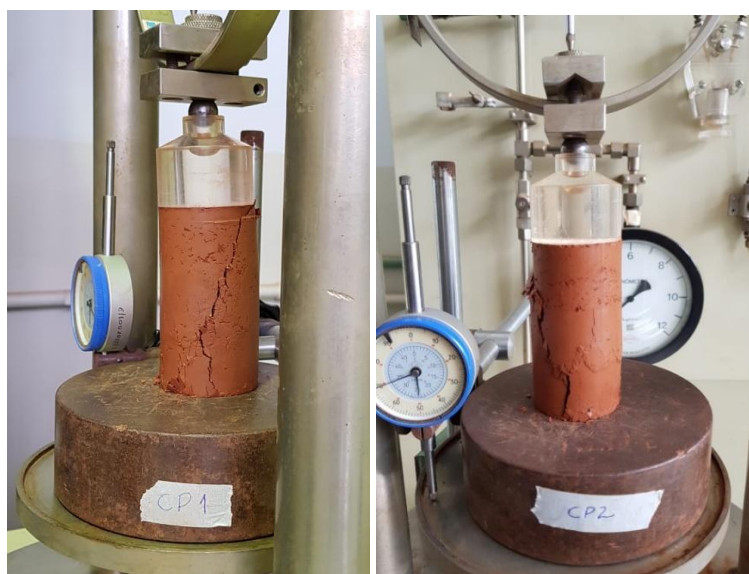
É possível notar pela Figura 18 e pela Tabela 3 que houve uma queda na resistência ao comparar os resultados obtidos na mistura (solo + 15% de resíduo de vidro) com os do solo natural, o que foi diferente do esperado em função do aumento da massa específica seca obtido na curva de compactação (Figura 18). Enquanto o solo apresentou uma resistência média de 130 kPa, a mistura apresentou apenas 120 kPa. A queda na resistência não foi algo significativo, representando apenas 8,33%. Entretanto, outro parâmetro a ser analisado é o módulo de elasticidade, que teve valor médio de 6,79 MPa para o solo natural e 2,85 MPa para a mistura, tendo uma redução de 57,96%.

A redução do módulo de elasticidade indica que a mistura se deforma mais facilmente quando submetida à mesma tensão que o solo natural, se apresentando menos rígida. Esse aspecto também pôde ser percebido visualmente e pela consistência do material em sua preparação, tanto para o ensaio de compactação quanto para o de compressão simples.

Pode-se concluir através dos resultados apresentados, que apesar do resíduo de vidro ter uma granulometria predominante de areia o comportamento obtido ao ensaiar a mistura à compressão simples não corresponde ao que se espera de uma mistura de areia com solo argiloso.

Nas Figuras 19 e 20 pode-se visualizar a superfície de ruptura dos corpos de prova moldados com solo natural e com a mistura de solo com resíduo de vidro, respectivamente. Nota-se em todos os casos, superfícies de ruptura bem definidas.

Figura 19 - (a) Ruptura Corpo de Prova 1 (b) Ruptura Corpo de prova 2 - Solo Natural



Fonte: Autor (2018).

Santos (2017) realizou ensaios de compressão simples em diferentes condições de compactação em uma amostra de solo coletada também no Campus Glória. No ensaio realizado na umidade ótima e massa específica seca correspondente foi obtido resultado de resistência não drenada igual a 48 kPa, que foi 26,15% menor que o obtido neste trabalho. Uma possível causa desta diferença está no teor de argila presente nas amostras, sendo 59% na amostra de Santos (2017) e 80% na amostra coletada por Almeida (2017).

Figura 20 - (a) Ruptura Corpo de Prova 1 (b) Ruptura Corpo de prova 2 - Mistura Solo e Resíduo de Vidro



Fonte: Autor (2018).

Benny *et al.* (2017) fizeram um estudo semelhante ao desta pesquisa, em uma mistura composta apenas por resíduo de vidro e um solo contendo 35% de argila. No geral, os resultados obtidos pelo autor foram melhorias no desempenho do solo proporcionalmente à adição de resíduo de vidro. Porém, os experimentos foram realizados com uma proporção máxima de 10% de resíduo de vidro, sendo que os autores cogitam a ocorrência de um teor ótimo em torno de 8%. Já Olufowobi *et al.* (2014), que testou resíduo de vidro e cimento em misturas com solo, observou a ocorrência de um teor ótimo de resíduo de vidro na mistura, entre 10 e 15%. Apesar de as condições de mistura de Olufowobi *et al.* (2014) e Benny *et al.* (2017) serem diferentes das testadas neste trabalho, tais pesquisas sugerem que a investigação de outros teores de adição de resíduo de vidro no solo do Campus Glória poderia indicar um fenômeno semelhante.

Comparando o resultado de resistência à compressão simples aos resultados obtidos por Winter (2018), que utilizou porcentagens de resíduo de vidro entre 10 e 30% juntamente com cal de carbureto, nota-se diferenças nas tendências de comportamento quando se utiliza ou não a cal, pois o autor constatou melhoria do desempenho nas misturas testadas. O aumento de resistência obtido por Winter (2018) provavelmente ocorreu devido a reações pozolânicas que podem ocorrer entre o resíduo de vidro que foi utilizado com o diâmetro dos grãos menor que 0,075 mm e a cal.

Diante da redução da resistência e do módulo de elasticidade encontrados nessa pesquisa é inviável a utilização do resíduo de vidro na granulometria e proporção pesquisadas nesta pesquisa para a melhoria de solos. Entretanto, ao comparar a pesquisa com as realizadas por Benny *et al.* (2017), Winter (2018) e Olufowobi *et al.* (2014), é possível constatar que podem ser realizados estudos em outras proporções e com diâmetro médio dos grãos menor que podem gerar bons resultados, não descartando a possibilidade de empregar o resíduo para os fins aqui investigados.

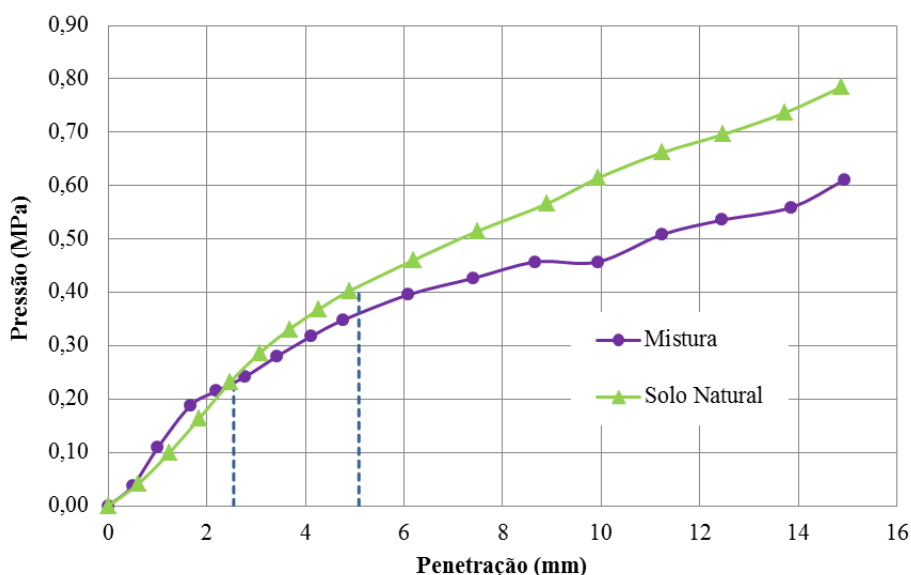
4.4 Índice de suporte Califórnia da mistura

Com as características do solo obtidas no ensaio de compactação também foram realizados os ensaios de expansão e CBR. O maior valor obtido pelo ensaio de expansão para o solo natural foi de 0,096% e para a mistura de 0,017%. Nota-se que a expansão para ambas as amostras foi muito pequena, entretanto o valor obtido para o solo foi maior que para a mistura.

Além disso, a umidade em que o corpo de prova da amostra de solo natural foi moldada foi igual a 30,92%, aumentando para 31,16% no fim do ensaio, quando o solo se encontrava saturado, havendo uma variação de 0,24%. Já o corpo de prova moldado com a mistura, tinha inicialmente uma umidade de 27,28%, aumentando para 27,60%, havendo uma variação de 0,32%, quantidade pouco maior que a do solo natural, não sendo significativa. Pode-se perceber também que os valores de umidade encontrados para o solo natural e para a mistura saturados são próximo aos valores de umidade ótima.

Posteriormente ao ensaio de expansão, foi realizado o ensaio de CBR, cujos resultados obtidos estão ilustrados na Figura 22. Os valores de CBR encontrados foram de 3,96% para o solo natural e 3,38% para a mistura. Não havendo uma diferença significativa entre os resultados. Nota-se pela Figura 21 que à medida que a penetração do pistão foi aumentando, a diferença de comportamento do solo e da mistura foi aumentando gradualmente. Com o aumento da penetração o solo em seu estado natural demonstrou uma pressão maior que a da mistura, indicando assim possuir uma capacidade de carga maior.

Figura 21 - Ensaio CBR - Curvas Penetração x Pressão



Fonte: Autor (2018).

Almeida (2017), também realizou os ensaios de expansão e CBR com a mesma amostra, obtendo um valor de expansão para energia de compactação normal igual a 0,23% e CBR igual a 4%. O valor da expansão obtido pelo ensaio realizado nessa

pesquisa foi menor que o encontrado por Almeida (2017), ainda assim, ambos são valores baixos. Já os valores iguais de CBR contribuem para a validação do resultado.

No que se refere no efeito da adição de resíduo de vidro sobre o índice de suporte, Benny *et al.* (2017) constatou que os valores somente melhoravam até o teor de 6%, dentro de um intervalo de 0 a 8%. Sendo assim, os resultados de CBR corroboram com a hipótese de que o teor de 15% de resíduo de vidro pode estar acima de uma quantidade que possa ser considerada ideal para o solo do Campus Glória quando compactado na energia Proctor Normal.

Por fim, tem-se que os ensaios CBR e compressão simples apontam para uma deterioração das características mecânicas do solo quando em mistura com 15% de resíduo de vidro, tanto no que se refere à resistência quando à deformabilidade. Nota-se, no entanto, que as alterações foram pouco significativas em termos de resistência, sendo 8% a redução na compressão simples e menos de 1% no CBR, e mais pronunciadas em relação à deformabilidade, com queda de 58% no módulo tangente do ensaio de compressão simples.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise do desempenho mecânico de uma mistura de solo argiloso a 15% de resíduo de vidro. A caracterização e análise mecânica da mistura possibilitaram a percepção de mudança de comportamento do solo quando misturado ao vidro, trazendo conhecimentos e parâmetros para futuros experimentos.

Quando a mistura foi compactada no ponto ótimo da energia Proctor Normal, os resultados dos ensaios de compressão simples e CBR apontam para uma redução da resistência e aumento da deformabilidade do material, sendo esta última mais pronunciada.

Ao comparar com dados da literatura, que é recente e relativamente escassa sobre o assunto, notou-se que somente em poucas situações foram obtidos comportamentos semelhantes de deterioração das características do solo original, sendo também verificada na literatura uma porcentagem ótima de resíduo de vidro para ser adicionada ao solo ou à misturas de solo e cimento. Tal porcentagem ótima tende a ser menor que a utilizada neste trabalho, salvas as peculiaridades de cada pesquisa.

Com isso, entende-se que este trabalho pode ser base de pesquisas mais abrangentes e aprofundadas sobre a aplicação de resíduo de vidro em solos argilosos. Além disso, os resultados aqui apresentados não inviabilizam o aproveitamento do resíduo de vidro para misturas com solos, tendo em vista o caráter sustentável do produto geotécnico pesquisado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novas pesquisas neste tema, pode-se sugerir:

- Analisar o desempenho mecânico de um solo argiloso misturado a uma quantidade de 5% em massa de cal e 15% de resíduo de vidro para aplicação em reforço de solos para fundações rasas, tendo em vista que o teor de resíduo de vidro estudado neste trabalho pode trazer bons resultados ao ser misturado com a cal;
- Analisar o desempenho mecânico de um solo argiloso com diferentes porcentagens de resíduo de vidro com valores entre 5 e 15% para aplicação em reforço de solos para a estrutura de pavimentos asfálticos, buscando encontrar um teor ótimo da substância, visto que há trabalhos com resultados positivos em relação a esse tipo de mistura;
- Analisar o desempenho mecânico de um solo arenoso com 15% de resíduo de vidro para a realização de reforços de solos com colunas de solo tratado, tendo em vista que o mesmo teor de resíduo de vidro estudado neste trabalho pode ter resultados diferentes ao ser misturado em um solo arenoso.
- Analisar o desempenho mecânico da mistura de resíduo de vidro com um solo argiloso nos teores de 25%, 50% e 75%, incluindo um ensaio de CBR somente no resíduo, buscando visualizar melhor o efeito do material sobre o solo.

REFERÊNCIAS

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: 29 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS – ABRAVIDRO (Brasil). **O mercado vidreiro em números 2018.** 2018. Disponível em: <<https://pdf.magtab.com/leitor/136/edicao/18702>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **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.

_____. **NBR 9895:** Solo – Índice de Suporte Califórnia 1987.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12770:** Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE VIDRAÇARIAS (Brasil). **Aprenda como reciclar e descartar cacos e pó de vidro.** 2018. Disponível em: <<http://www.anavidro.com.br/aprenda-como-reciclar-e-descartar-cacos-e-po-de-vidro/>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

BENNY, J. R.; JOLLY, J.; MAREENA, S. J.; THOMAS, M. Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 6, n. 5, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV6IS050024>.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília – DF, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1973.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3349/000291907.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 jun. 2018.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. (Brasil). **Vidro**. 2019. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

GUEDES, E. S. R.; JÚNIOR, W. R. A. **Estudo do Comportamento de Misturas de Solo e Agregado de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Sergipe**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COMBRAMSEG), XVIII, 2016, Belo Horizonte. Belo Horizonte: ABMS, 2016. 7 p. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/GJ-01-0047.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

FREITAS, Milena Cardoso de. **Avaliação técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-28112016.../dissertacao_milena.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2019.

KARTHIK, S.; ASHOK KUMAR, E.; GOWTHAM, P.; ELANGO, G.; GOKUL, D.; THANGARAJ, S. Soil stabilization by using fly ash. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 10, n. 6, p. 20-26, 2014. Disponível em: <<http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol10-issue6/D01062026.pdf>>. Acesso em: out. 2018.

LEAL, Ubiratan. **Quando é preciso reforçar o solo**. *Téchne*. v. 71, fev. 2003. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/71/artigo287255-1.aspx>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6646/000444396.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

MACÊDO, Maria Mirtes de. **Solos modificados com cimento -Efeito no Módulo de Resiliência e no Dimensionamento de Pavimentos**. 2004. 309 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5694/1/arquivo6354_1.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018.

OLUFOWOBI, J.; OGUNDOJU, A.; MICHAEL, B.; ADERINLEWO O. Clay soil stabilization using powdered glass. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 9, n. 5, p. 541-558, 2014.

PASSOS, P. G. O. **Melhoramento de solos arenosos com estacas de areia e brita**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005. 159 p. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/6591>>. Acesso em: 29 jan. 2019.

PINTO, Salomão. **Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinza Volante**. 1971. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2286/1/000124129.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2018.

RIBEIRO, Anderson Osvaldo. **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: 27 nov. 2018.

RODIER, Loïc; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. 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: 28 nov. 2018.

SANTOS, Laura de Lima. **Resistência à compressão simples de um solo não saturado do município de Uberlândia/MG**. Relatório de iniciação científica – PIVIC FAPEMIG 2016 – 0425, Universidade Federal de Uberlândia, 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.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; dos SANTOS, J. C. P. Vidros na construção civil. ISAIA, G. C. (ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. v. 2. 1ed. São Paulo, IBRACON, 2007.

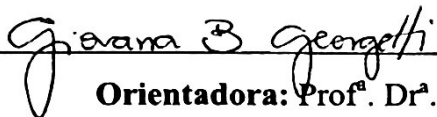
SILVEIRA, L.R.; BORGES, R. A. Uso de materiais alternativos para melhoria de solo na pavimentação de vias. **Engeneering and Science**, v.1, n.5, 2016. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3418>>. Acesso em: out. 2018.

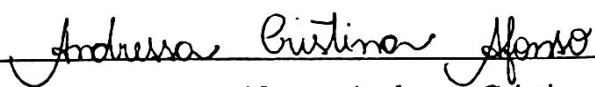
SOTOMAYOR, Juan Manuel Girao. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=25290@1>. Acesso em: 28 nov. 2018.

VG RESÍDUOS. **Entenda a diferença entre resíduos inertes e não inertes.** 2017. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/entenda-a-diferenca-entre-residuos-inertes-e-nao-inertes/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

WINTER, Daniel. **Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis.** 2018. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/174398>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

FOLHA DE ASSINATURAS


Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Giovana Bizão Georgetti


Aluna: Andressa Cristina Afonso

Uberlândia, 10 de janeiro de 2019.