

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**NICOLE GRAEFF FARIAS MUCHINSKI**

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM PÓ DE VIDRO E CAL: COMPARAÇÃO  
ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO VERMELHO E DO SOLO  
ROSA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

**CURITIBA**

**2021**

**NICOLE GRAEFF FARIAS MUCHINSKI**

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM PÓ DE VIDRO E CAL: COMPARAÇÃO  
ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO VERMELHO E DO SOLO  
ROSA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

**Improvement of soils with glass powder and lime: Comparison between the  
mechanical behavior of red and pink soil from the Guabirota formation**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Ronaldo Luís dos Santos Izzo

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**NICOLE GRAEFF FARIAS MUCHINSKI**

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM PÓ DE VIDRO E CAL: COMPARAÇÃO  
ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO VERMELHO E DO SOLO  
ROSA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/Dezembro/2021

---

Adauto José Miranda de Lima  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Janine Nicolosi Correa  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ronaldo Luis dos Santos Izzo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA  
2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Ivo e Sonia, a minha irmã Julia e ao meu marido Felipe por todo apoio, incentivo, colaboração e paciência nos momentos em que mais precisei.

Agradeço ao meu orientador Ronaldo Izzo pelo profissionalismo, dedicação e apoio não só durante esse período, mas sim por todo nosso tempo de trabalho.

Agradeço às minhas companheiras de trabalho Mirian e Paula, por me auxiliarem nas atividades, por compartilharem seus conhecimentos e por me permitirem participar junto de suas pesquisas.

Agradeço a todos os meus amigos, por me apoiarem e me ajudarem da melhor forma possível sempre que precisei.

## RESUMO

O processo de urbanização no Brasil se intensifica a cada ano. Com isso, tem-se a necessidade de realizar novas construções e rodovias, porém nem todos os solos são aptos para as tais necessidades. Portanto, o melhoramento de solos auxilia nas novas construções de modo que o solo problemático não se torna o impeditivo para o projeto. O cimento e a cal já são utilizados para realizar esse procedimento, mas diante dos altos custos do cimento Portland e dos impactos ambientais tem-se considerado o uso de resíduos para o melhoramento mecânico do solo. O pó de vidro é um resíduo da indústria e do processo de reciclagem do vidro que possui propriedades pozolânicas que são interessantes para a estabilização dos solos. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de dois solos com características físicas e químicas diferentes diante da adição de pó de vidro e cal. O solo vermelho é mais argiloso do que o solo rosa, sendo assim o solo rosa apresenta maior resistência mecânica do que o solo vermelho. O solo vermelho apresentou-se 140% mais resistente com as misturas finais do que o solo rosa nos ensaios de compressão simples e 200% mais resistente ao ensaio de tração por compressão diametral. Portanto, os dois solos melhorados com cal e pó de vidro obtiveram ganho de resistência mecânica, mas cada um comportou-se de forma única diante dos aditivos.

**Palavras-chave:** Melhoramento de solos. Resíduo. Pó de vidro.

## ABSTRACT

The urbanization process in Brazil intensifies every year. Thus, there is a need to carry out new constructions and roads, but not all soils are suitable for such needs. Therefore, soil improvement aids in new construction so that the problematic soil does not become a deterrent to the project. Cement and lime are already used to carry out this procedure, but given the high costs of Portland cement and the environmental impacts, the use of residues for mechanical soil improvement has been considered. Glass dust is a waste from the industry and from the glass recycling process that has pozzolanic properties that are interesting for soil stabilization. The objective of this work is to evaluate the mechanical behavior of two soils with different physical characteristics and materials in face of the addition of glass powder and lime. Red soil is more clayey than pink soil, so pink soil has greater mechanical strength than red soil. The red soil was 140% more resistant as final mixtures than the pink soil in the simple compression tests and 200% more resistant to the tensile test by diametrical compression. Therefore, the two soils improved with lime and glass powder obtained a gain in mechanical strength, but each behaved in a unique way when faced with the additives.

**Keywords:** Soil improvement. Residue. Glass powder.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização da Bacia Sedimentar em Curitiba.....                                                         | 13 |
| Figura 2 - Estratificação da Formação Guabirota.....                                                                | 14 |
| Figura 3 - Esquema dos tipos de estabilização e os principais processos.....                                        | 16 |
| Figura 4 - Curva típica de compactação indicando a umidade ótima em relação a massa específica seca de um solo..... | 17 |
| Figura 5 - Localização do local das duas amostras.....                                                              | 26 |
| Figura 6 - Curva granulométrica solo vermelho com lavagem.....                                                      | 35 |
| Figura 7 - Curva granulométrica do solo rosa com lavagem.....                                                       | 36 |
| Figura 8 - Realização do ensaio de LP do solo rosa.....                                                             | 38 |
| Figura 9 – Ensaio de Gs do solo rosa.....                                                                           | 39 |
| Figura 10 – Processo da retirada do ar dos balões volumétricos.....                                                 | 39 |
| Figura 11 - Ensaio de compressão simples do solo vermelho.....                                                      | 43 |
| Figura 12 - Corpo de prova após o rompimento no ensaio de compressão simples.....                                   | 44 |
| Figura 13 - Ensaio de compressão simples do solo vermelho.....                                                      | 52 |
| Figura 14 - Ensaio de tração por compressão diametral do solo vermelho.....                                         | 60 |
| Figura 15 - Corpo de prova após o rompimento no ensaio de tração por compressão diametral.....                      | 61 |
| Figura 16 - Ensaio de tração por compressão simples do solo vermelho.....                                           | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Análise de Variância.....                                                                           | 30 |
| Tabela 2 - Massa específica real do grão de cada material .....                                                | 40 |
| Tabela 3 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 7 dias de cura.....                 | 45 |
| Tabela 4 – Análise de variância do solo vermelho para 7 dias de cura.....                                      | 45 |
| Tabela 5 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho 7 dias de cura.....                                     | 46 |
| Tabela 6 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 28 dias de cura.....                | 47 |
| Tabela 7 - Análise de variância para o solo vermelho e 28 dias de cura .....                                   | 48 |
| Tabela 8 - Teste Turkey-Kramer para o solo vermelho e 28 dias de cura.....                                     | 48 |
| Tabela 9 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 90 dias de cura.....                | 49 |
| Tabela 10 - Análise de variância do solo vermelho e 90 dias de cura.....                                       | 49 |
| Tabela 11 - Análise da variância para o solo vermelho e 7 dias de cura .....                                   | 50 |
| Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 7 dias de cura .....                   | 53 |
| Tabela 13 - Análise de variância do solo rosa e 7 dias de cura .....                                           | 53 |
| Tabela 14 - Análise da variância para o solo rosa e 7 dias de cura .....                                       | 54 |
| Tabela 15 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 28 dias de cura .....                  | 55 |
| Tabela 16 - Análise de variância do solo rosa e 28 dias de cura .....                                          | 55 |
| Tabela 17 - Análise da variância para o solo rosa e 28 dias de cura .....                                      | 56 |
| Tabela 18 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 60 dias de cura .....                  | 57 |
| Tabela 19 - Análise de variância do solo rosa para 60 dias .....                                               | 57 |
| Tabela 20 - Análise da variância do solo rosa e 60 dias .....                                                  | 58 |
| Tabela 21 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 7 dias de cura.....                | 62 |
| Tabela 22 - Análise de variância do solo vermelho para 7 dias .....                                            | 62 |
| Tabela 23 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho e 7 dias de cura.....                                  | 63 |
| Tabela 24 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo vermelho com 28 dias de cura ..... | 64 |
| Tabela 25 - Análise da variância do solo vermelho para 28 dias .....                                           | 64 |
| Tabela 26 - Análise da variância do solo vermelho para 28 dias .....                                           | 65 |
| Tabela 27 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo vermelho com 90 dias de cura ..... | 66 |
| Tabela 28 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 7 dias de cura .....      | 69 |
| Tabela 29 - Análise de variância do solo rosa para 7 dias .....                                                | 70 |
| Tabela 30 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho e 7 dias de cura.....                                  | 70 |



|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 31 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 28 dias de cura ..... | 71 |
| Tabela 32 - Análise de variância do solo rosa para 28 dias .....                                           | 72 |
| Tabela 33 - Teste de Turkey-Kramer para o solo rosa e 28 dias de cura .....                                | 72 |
| Tabela 34 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 60 dias de cura ..... | 73 |
| Tabela 35 - Análise de variância do solo rosa para 60 dias .....                                           | 74 |
| Tabela 36 - Teste de Turkey-Kramer para o solo rosa e 28 dias de cura .....                                | 74 |
| Tabela 37 - Resultados da caracterização física dos solos.....                                             | 76 |
| Tabela 38 - Análise de variância entre o solo vermelho o solo rosa .....                                   | 77 |
| Tabela 36 - Teste de Turkey-Kramer para comparação do dois solos.....                                      | 78 |
| Tabela 40 - Análise de variância entre o solo vermelho o solo rosa .....                                   | 79 |
| Tabela 41 - Teste de Turkey-Kramer para comparação do dois solos.....                                      | 79 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Relação entre teor de cal e resistência a compressão simples para tempo de cura de 60 dias.....            | 20 |
| Gráfico 2 Relação entre teor de cal e resistência a tração por compressão diametral para tempo de cura de 60 dias..... | 20 |
| Gráfico 3 - Curvas de compactação do solo vermelho.....                                                                | 41 |
| Gráfico 4 - Curvas de compactação do solo rosa.....                                                                    | 42 |
| Gráfico 5 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 90 dias de cura.....                | 51 |
| Gráfico 6 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 60 dias de cura.....                | 59 |
| Gráfico 7 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 90 dias de cura.....                | 67 |
| Gráfico 8 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 60 dias de cura.....                | 75 |
| Gráfico 9 – Tendência do comportamento da resistência a compressão simples dos solos.....                              | 77 |
| Gráfico 10 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral dos dois solos.....                               | 79 |

## SUMÁRIO

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                      | <b>8</b>  |
| <b>1.1 OBJETIVOS .....</b>                     | <b>10</b> |
| 1.1.1 Geral .....                              | 10        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos.....               | 10        |
| <b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>                 | <b>11</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>           | <b>12</b> |
| <b>2.1 FORMAÇÃO GUABIROTUBA .....</b>          | <b>12</b> |
| <b>2.2 MELHORAMENTO DE SOLOS .....</b>         | <b>14</b> |
| 2.2.1 Estabilização Física .....               | 16        |
| 2.2.2 Estabilização Mecânica .....             | 16        |
| 2.2.3 Estabilização Química .....              | 18        |
| <b>2.3 SOLO E CAL .....</b>                    | <b>18</b> |
| <b>2.4 SOLO E CIMENTO .....</b>                | <b>21</b> |
| <b>2.5 SOLO E PÓ DE VIDRO .....</b>            | <b>22</b> |
| 2.5.1 Pó de Vidro .....                        | 22        |
| 2.5.2 Solo com Adição de Pó de Vidro .....     | 23        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>              | <b>25</b> |
| <b>3.1 MATERIAIS .....</b>                     | <b>25</b> |
| 3.1.1 Solo.....                                | 25        |
| 3.1.2 Cal .....                                | 26        |
| 3.1.3 Água .....                               | 27        |
| 3.1.4 Pó de vidro.....                         | 27        |
| <b>3.2 METODOLOGIA.....</b>                    | <b>27</b> |
| 3.2.1 Teor de cal e pó de vidro .....          | 27        |
| 3.2.2 Tempo de cura.....                       | 28        |
| 3.2.3 Análise estatística .....                | 28        |
| <b>3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS .....</b>      | <b>30</b> |
| 3.3.1 Análise granulométrica .....             | 31        |
| 3.3.2 Limites de Attenberg .....               | 31        |
| 3.3.3 Massa específica real dos grãos.....     | 32        |
| <b>3.4 COMPACTAÇÃO .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>3.5 COMPRESSÃO SIMPLES E A TRAÇÃO .....</b> | <b>33</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>         | <b>34</b> |
| <b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....</b>   | <b>34</b> |
| 4.1.1 Análise granulométrica .....             | 34        |
| 4.1.2 Limites de Attenberg .....               | 36        |
| 4.1.3 Massa específica real dos grãos.....     | 38        |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.2 COMPACTAÇÃO .....</b>                                   | <b>40</b> |
| 4.2.1 Solo vermelho .....                                      | 40        |
| 4.2.2 Solo rosa.....                                           | 41        |
| <b>4.3 COMPRESSÃO SIMPLES .....</b>                            | <b>42</b> |
| 4.3.1 Solo vermelho .....                                      | 43        |
| 4.3.2 Solo rosa.....                                           | 51        |
| <b>4.4 TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....</b>               | <b>59</b> |
| 4.4.1 Solo vermelho .....                                      | 60        |
| 4.4.2 Solo rosa.....                                           | 68        |
| <b>4.5 COMPARAÇÃO ENTRE O SOLO VERMELHO E O SOLO ROSA.....</b> | <b>75</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                                        | <b>81</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                        | <b>82</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de construção de novas edificações e da construção de novas vias públicas, rodovias e modernização de vias rurais ocorre por conta da expansão das cidades, ou seja, por conta da urbanização. Com isso, têm-se a necessidade de construção de novas edificações, novas rodovias ou modernização e ampliação delas. Então, o fator mais importante das construções civis tem sido o local da construção, independente das condições da região, como: o quanto o solo é compatível com a necessidade construtiva. Os solos argilosos e orgânicos são mais trabalhosos para a construção civil e podem aparecer nos locais de interesse. Portanto, a tendência é cada vez mais a engenharia civil se deparar com estes desafios geotécnicos: como compatibilizar o solo e construção.

Quando se trabalha com solos o engenheiro precisa reconhecer as características do material, determinar a sua composição, o seu comportamento, propriedades físicas e químicas. Dentre essas características algumas são as principais e mais básicas para o reconhecimento do material, como: composição, granulometria, limites de consistência, teor de umidade e grau de compactação. Todas essas informações reunidas facilitam o manuseio do solo, permitem o seu bom uso e determinarão se o solo é útil ou não para o interesse (SANTOS, 2012).

A engenharia civil é motivada a pesquisar e obter saídas viáveis para adequar solo e construção. Uma opção para as edificações é a utilização de fundações profundas garantindo maior estabilidade estrutural no caso de solos problemáticos. Porém, quanto mais profundas as fundações, maior a complexidade dos cálculos, maior a quantidade de material, ou seja, as fundações profundas acabam elevando o custo da obra. Quando se trata das construções de pavimentação o uso de estruturas mais profundas como forma de trazer estabilidade se torna impraticável devido a sua dimensão. Outra opção é o melhoramento das características mecânicas do solo, tornando-o apto para as construções de edificações ou de pavimentação.

De forma geral, o melhoramento do solo é realizado com cimento Portland e Cal, principalmente pela fácil disponibilidade destes materiais. Porém, por conta do custo e dos efeitos nocivos ao meio ambiente, uma das alternativas é a substituição

do cimento Portland por resíduos industriais e domésticos. Uma das características desejáveis dos resíduos é a atividade pozolânica e a alcalinidade. Neste trabalho é abordado o melhoramento do solo pela adição do pó de vidro, material com atividade pozolânica (MASSAZA, 2004). Segundo Saldanha et al. (2018), a Cal se enquadra como ativador alcalino na mistura entre resíduo e solo, permeando as reações pozolânicas.

A produção do vidro, assim como a produção de grande parte dos produtos que são utilizados hoje em dia, acaba gerando gases nocivos para o meio ambiente além de lixos e resíduos derivados da produção. No caso do vidro, quando descartado corretamente pode ser reciclado e reutilizado para a produção de novos vidros, por exemplo. Porém essa ideia não é tão disseminada por parte da população, sendo descartado erroneamente ou encaminhando para os lixões sem oportunidade de ser reutilizado. Portanto, a utilização do resíduo da produção ou do descarte do vidro traz benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a área onde o vidro será reutilizado, no caso desse trabalho, será analisado o uso do resíduo de vidro na engenharia (SCHEUERMANN, 2019).

O resíduo do vidro, especificamente, o pó de vidro será analisado na mistura de solos para o melhoramento deste. Curitiba, local de onde será realizado este estudo, está majoritariamente situada sobre a bacia sedimentar da formação Guabirota são 300 km<sup>2</sup> de bacia sedimentar em Curitiba e 900 km<sup>2</sup> ao total (FELIPE, 2011). A formação Guabirota tem origens na época do Terciário derivado principalmente de rochas do período Paleoproterozóico. O solo da formação Guabirota é formado por xistos, gnaisses, gnaisses-granitos, quartzitos e anfibolitos, todos esses minerais se resumem em um solo com dobras de cisalhamento, bancos de argila depósitos rudáceos e finos depósitos carbonáticos e areias. A formação geológica Guabirota possui inúmeras camadas de solo e estruturalmente cada camada está situada entre zonas de cisalhamentos rúpteis. As camadas que contém maiores quantidades de argilas e siltes são maciças e cinzas esverdeadas. Já os depósitos rudáceos são encontrados majoritariamente nas bordas da bacia e possuem colorações mais avermelhadas (SALAMUNI, 1999).

Em Curitiba e Região Metropolitana há solos distintos dependo da região, porém são da mesma formação geológica. O que acontece é que há diferentes

camadas do solo da formação Guabirotuba pela região de Curitiba e Região Metropolitana. Há locais em que o solo corresponde à primeira camada e há locais em que são encontrados solos das camadas seguintes a primeira. Os solos de diferentes camadas são identificados e diferenciados principalmente pela coloração.

Como os solos em estudos provêm da mesma formação geológica, mas possuem características diferentes, a análise de ambos com o mesmo material cimentante dirá sobre a eficiência desse método quanto ao solo da região de Curitiba/PR. Ainda, os teores de cal e pó de vidro e o tempo de cura serão diversificados, produzindo informações mais precisas para auxiliar eventuais necessidades de projetos que venham a ser realizados em Curitiba nessas condições.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o ganho de resistência mecânica e a possibilidade de utilização de dois solos de diferentes camadas da formação Guabirotuba melhorados com cal e pó de vidro.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho, são:

- Avaliar o ganho de resistência mecânica e a possibilidade de utilização de dois solos da formação Guabirotuba melhorados com cal e pó de vidro.
- Utilização do pó de vidro como aditivo ao solo.
- Caracterizar fisicamente o solo que será utilizado.
- Avaliar como cada solo se comporta variando as quantidades dos resíduos misturados.
- Comparar as tendências de melhoramento dos dois solos e seus resultados.

## 1.2 Justificativa

Em grande parte, as construções direcionam suas cargas para o solo. Nem sempre o solo é próprio ou autossuficiente, necessitando assim, realizar reforços com cal e cimento Portland. Segundo ITAMBÉ (2019) o cimento é o segundo recurso mais consumido do planeta, perdendo apenas para a água. A principal questão é que o cimento possui grande responsabilidade na emissão de gás carbônico no meio ambiente. Hoje, o cimento é responsável por 5% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo e segundo estudos se o consumo de cimento não for freado por alguma tecnologia ou algum material alternativo, futuramente a produção de cimento será responsável por 20% da emissão de CO<sub>2</sub> (POLI-USP, 2013). Portanto, por conta do impacto ambiental e, também, dos altos custos é importante a utilização de resíduos como alternativa para o cimento Portland.

Um dos resíduos que tem sido amplamente estudado é o pó de vidro. O vidro em si necessita de altas temperaturas para ser produzido, gerando emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (2019) um quilograma de vidro reciclado se faz um quilograma de vidro novo, ou seja, produção de vidro sem emissão de CO<sub>2</sub>. Portanto o vidro pode ser 100% reciclado e isso implica em menor consumo de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e menos contaminação e ocupação nos aterros, visto que o vidro seria destinado a reciclagem.

Portanto, a utilização de resíduo de vidro no melhoramento de solos é benéfica tanto para a diminuição de consumo de cimento quanto para o meio ambiente, para os aterros por conta da utilização do vidro descartado.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Formação Guabirotuba

A formação Guabirotuba encontra-se sobre as rochas do complexo Cristalino que são constituídas principalmente de argilas siltosas ou siltes argilosos. Essa formação é encontrada na região metropolitana de Curitiba com área aproximada de 3000 km<sup>2</sup>. Os materiais granulares presentes na formação Guabirotuba tornam o solo diversificado, podendo ter colorações cinzas, esverdeadas, marrons e no caso de locais mais suscetíveis ao intemperismo, tem-se uma coloração mais avermelhada, rosada e amarelada (KORMANN, 2002). A Figura 1 contém uma imagem com a localização da bacia sedimentar de Curitiba.

Segundo Salamuni et al. (1999), a topografia da bacia tem várias diferenças pela sua extensão, mas, de forma geral, as porções regiões mais altas com solos mais recentes estão situados a NE e os solos mais baixos e antigos estão para SW.

Os solos argilosos possuem uma consistência elevada, são rijos e, além disso, esses solos estão frequentemente ligados a acidentes em obras por se tornar instável quando escavados (KORMANN, 2002). O perfil típico de alteração dos litotipos da Formação Guabirotuba (Figura 2) foi ilustrado conforme as características qualitativas e quantitativas de cada estratificação (FELIPE, 2011).

O Solo Residual Maduro possui cor vermelha, é argiloso e a argila predominante é a Caulinita. Possui uma resistência à penetração baixa e permeabilidade média. A massa específica seca máxima do ensaio de Proctor é aproximadamente 1,4g/cm<sup>3</sup>, umidade ótima 26,8%, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade próximo à 56,3 e 36,6 respectivamente. A sua camada pode ser encontrada de 0,5 m a 5,0 m (FELIPE, 2011).

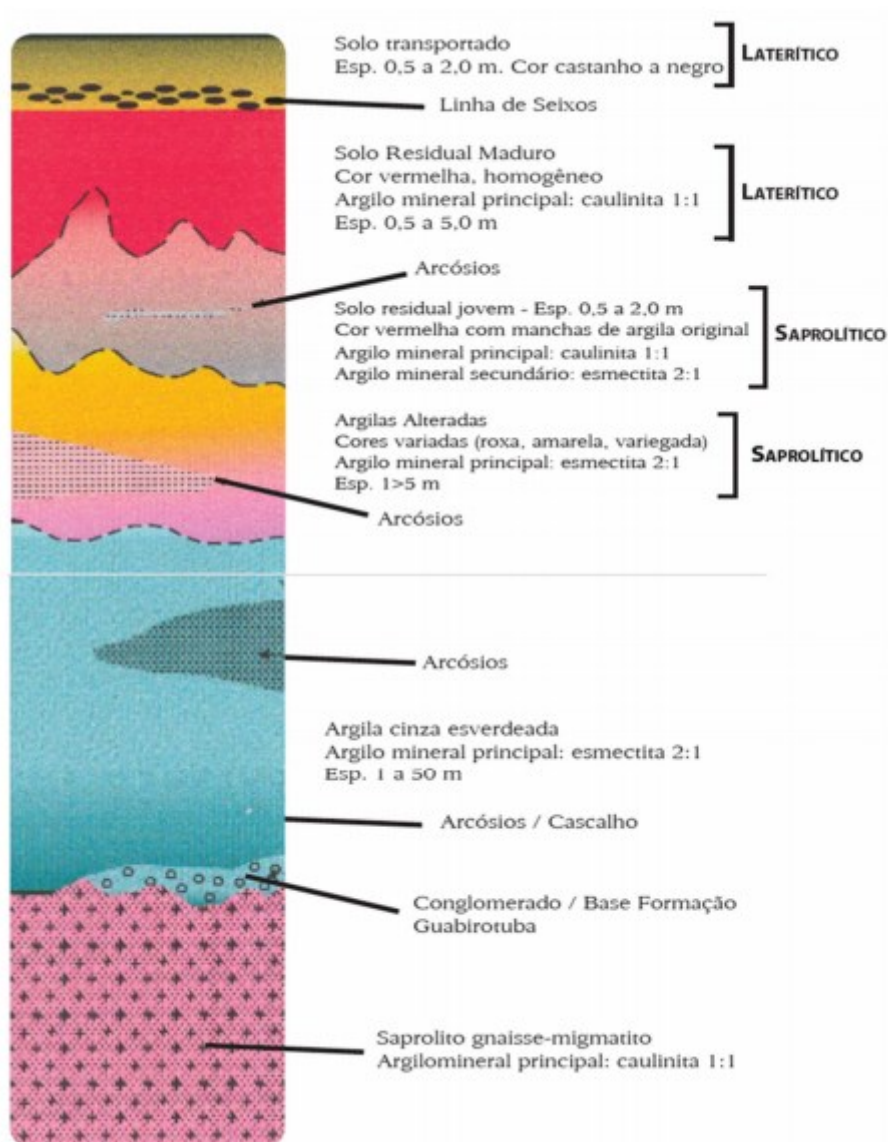
Figura 1 - Localização da Bacia Sedimentar em Curitiba



Fonte: Salamuni et al. (1999).

Já a Argila Alterada é saprólito, cores arroxeadas ou amareladas, o principal argilo mineral encontrado é a esmectita. Possui resistência a penetração média, é uma argila expansiva, possui alta reatividade. A massa específica seca máxima do ensaio de Proctor é aproximadamente  $1,5\text{g/cm}^3$ , umidade ótima em torno de 27,8%, LL e LP correspondente a 62,8 e 35,5 respectivamente (FELIPE, 2011).

Figura 2 - Estratificação da Formação Guabirota



Fonte: Felipe (2011).

As camadas de solo da formação Guabirota são diferenciadas principalmente pelo mineral principal presente e pela coloração do solo de cada camada.

## 2.2 Melhoramento de Solos

Devido ao aumento da quantidade de construções, os solos ótimos, com boa resistência, vêm se tornando menos disponíveis para a construção, ou seja, os solos

ainda disponíveis para a construção muitas vezes são solos compostos por argilas moles ou são solos orgânicos.

Acontece destes solos naturais não serem mecanicamente adequados as construções necessárias. Uma das soluções é alterar seu comportamento mecânico através de processos físicos, mecânicos e químicos. Ou seja, o desafio da engenharia é viabilizar o solo natural para que se torne apto ao que é destinado através de métodos financeiramente e tecnicamente viáveis, como por exemplo utilizando resíduos como aditivos capazes de estabilizá-lo mecanicamente (CRUZ E JALALI, 2010). Segundo Paula (2013), a área da engenharia mais propícia à necessidade do melhoramento do solo é a de transportes. A construção de rodovias, aeroportos, ferrovias muitas vezes ocorre sobre solos moles.

No caso da construção de edifícios, a alternativa mais utilizada, quando necessário realizá-la em solos moles, é a fundação em estacas ou caixões por exemplo. Porém, em situações de construções sociais, por exemplo, esse tipo de fundação é responsável pela maior parte dos custos da obra, o que a torna financeiramente inviável. Nesses casos o melhoramento do solo pode ser uma alternativa e deve ser levada em consideração (THOMÉ et al., 2005, *apud* PAULA, 2013).

A estabilização do solo tem como objetivo aprimorar as características do solo, como: aumentar a resistência mecânica e a resistência à água. Esse método pode ser realizado de três maneiras: Estabilização mecânica, física e química. A escolha do tipo de estabilização depende das propriedades do solo e as propriedades desejadas (SANTOS, 2012).

A Figura 3 apresenta um esquema simples com os tipos de estabilização do solo e cada procedimento que pode ser realizado. Na estabilização mecânica o procedimento mais utilizado é a compactação e a correção granulométrica. Já na estabilização física é o tratamento por temperatura e na estabilização química. Os materiais mais utilizados são o cimento e a cal (SALES, 2006; SANTO, 2012).

Figura 3 - Esquema dos tipos de estabilização e os principais processos



Fonte: Cruz e Jalali (2010).

### 2.2.1 Estabilização Física

A estabilização física corresponde aos processos que envolvem mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção. Esses processos promovem um melhoramento nas características estruturais dos solos e de sua drenagem (CRUZ; JALALI, 2010).

### 2.2.2 Estabilização Mecânica

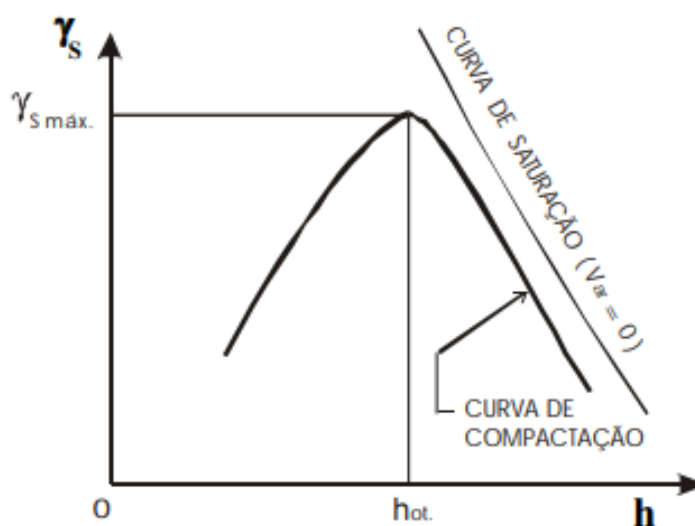
A estabilização mecânica engloba todos os processos que envolvem apenas o próprio solo, sem adição de novos materiais. Os métodos utilizados são a compactação e a correção granulométrica. A compactação do solo irá diminuir o volume de vazios, reduzir os poros para a percolação da água e aumentar a compacidade do solo por meio da aplicação de energia ao solo. A estabilização granulométrica age corrigindo a curva granulométrica do solo, variando as dimensões

das partículas de forma que a combinação delas ocupe o menor volume possível, preenchendo os vazios e aumentando a resistência (SANTOS, 2012).

Os principais resultados obtidos com a estabilização mecânica através da compactação é o aumento da massa específica, redução de vazios e o aumento da resistência ao cisalhamento. (JUNIOR, 2005). A técnica de compactação em solos teve início com o engenheiro norte Americano, Proctor, em 1933. Proctor desenvolveu um método para determinar a curva de compactação através da relação massa específica seca e teor de umidade do solo. A partir disso houve várias evoluções até chegar ao modelo de compactação (PINTO, 2000).

Com base nos estudos e no método de Proctor, sabe-se que a massa específica do solo e o teor de umidade do solo dependem da energia da compactação. Resumidamente, em altos teores de umidade do solo obtém-se uma menor compactação menor resistência mecânica. Porém, em baixos níveis de umidade o solo fica seco dificultando a redução dos vazios. Essas relações podem ser observadas no gráfico típico de compactação (Figura 4). Com a variação do teor de umidade da amostra do ensaio busca-se o teor de umidade ótimo do solo (PINTO, 2000).

Figura 4 - Curva típica de compactação indicando a umidade ótima em relação a massa específica seca de um solo



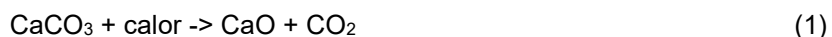
Fonte: Junior (2005).

### 2.2.3 Estabilização Química

A estabilização química corresponde a incorporação de um aditivo ao solo. Este método traz resultados através das reações químicas que ocorrem entre o aditivo e os minerais do solo. A adição de materiais ao solo resulta em reações químicas que conferem à mistura uma umidade ótima para a compactação, preenchendo os poros e, conseqüentemente, oferecem uma maior resistência e menor permeabilidade (MAKUSA, 2012). Segundo Santos (2012), os aditivos mais utilizados são os betumes, o cimento Portland, cal e pozolonas. Segundo Brito (2017), a escolha do aditivo, deve ser realizada em fundamentações técnicas, econômicas e ambientais.

## 2.3 Solo e Cal

Há registros da utilização da cal como estabilizante de solos desde o Império Romano, porém, somente após a segunda Guerra Mundial que a sua utilização se popularizou (BRITO, 2017). Segundo Marques (2006), a cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas carbonáticas e o produto desse processo são os óxidos de cálcio, conhecidos popularmente como a cal viva. Algumas reações de formação da cal serão expostas a seguir. Resumidamente, o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) da rocha quando em contato com o calor libera o CO<sub>2</sub>, obtendo o óxido de cálcio (CaO), esse processo é chamado de calcinação apresentada na **Erro! Fonte d e referência não encontrada..**



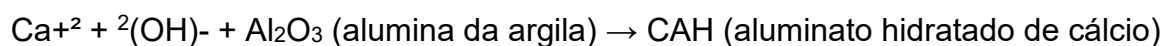
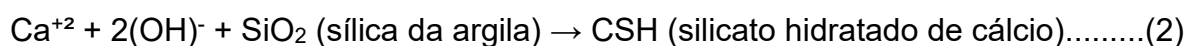
No mercado, a cal pode ser encontrada de duas formas: a cal viva (CaO) ou a cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>). A cal viva é o primeiro produto da reação de calcinação e a cal hidratada é quando a cal viva reage com a água (GONDIM, 2008) Porém, a cal hidratada irá variar a sua composição dependendo da rocha de origem da cal viva, os tipos de cales hidratadas e seus nomes são apresentadas no Quadro 1 (SILVA, 2016).

Quadro 1 – Tipos de cales

| Composição química                       | Nomeclatura                   |
|------------------------------------------|-------------------------------|
| CaO                                      | Cal cálcica virgem            |
| CaO.MgO                                  | Cal dolomítica virgem         |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                      | Cal cálcica hidratada         |
| Ca(OH) <sub>2</sub> .MgO                 | Cal dolomítica mono-hidratada |
| Ca(OH) <sub>2</sub> .Mg(OH) <sub>2</sub> | Cal dolomítica bi-hidratada   |

Fonte: Silva (2016).

A utilização da cal na construção civil pode ser justificada pelo aumento da plasticidade nas argamassas, pintura, fabricação de tijolos, bloco e estabilização de sub-bases e bases de pavimentos, ou seja, no melhoramento do solo (MARQUES, 2006). Segundo Brito (2017), a mistura de cal no solo é recomendada para solos argilosos ou siltosos. As reações químicas da cal em contato com o solo úmido ocorrem por modificação ou estabilização. A troca de cátions de cálcio por cátions presentes no solo com ph elevado caracterizam a modificação como pode-se observar na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (BRITO, 2017).



Onde: C = CaO,

S = SiO<sub>2</sub>,

A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

H = H<sub>2</sub>O (BRITO, 2017)

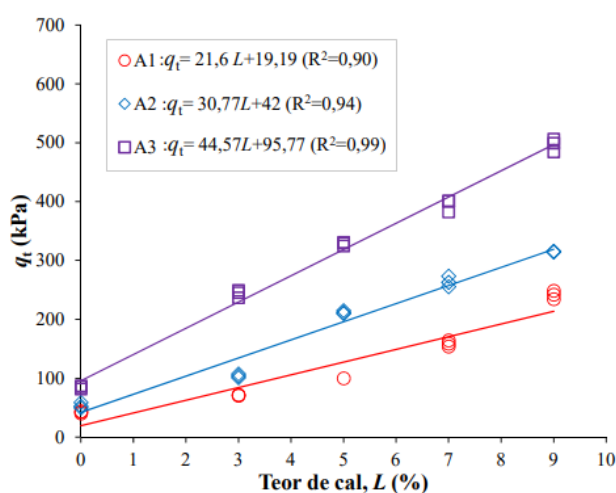
Segundo Gondim (2008), a cal possui propriedade aglomerante semelhante à do cimento, por esse motivo ela vem sendo utilizada no melhoramento de solos. A utilização da cal e do cimento como aglomerante difere no fato de que o cimento enrijece por meio de reações de hidratação dos compostos e a cal enrijece por meio das reações de recarbonatação. Além da propriedade aglomerante, a cal em contato com o solo e água provoca outras alterações físicas como a diminuição do limite de liquidez, o aumento do limite de plasticidade, aumento da resistência à compressão e aumento da capacidade de carga (MARQUES, 2006).



A cal, quando em contato com o solo úmido, promove reações químicas importantes, como a troca de cátions. Além disso, a cal provoca reações de floculação e aglomeração, pozolânicas e de carbonatação. A floculação e a aglomeração ocorrem pela diminuição da dupla camada e então a floculação das partículas de argila. As reações pozolânicas se resumem na reação da sílica e da alumina do solo com a cal. O resultado dessa reação é a produção de agentes cimentantes que aumentam a resistência mecânica da mistura. Já a carbonatação tem o mesmo princípio, a cal reage com o  $\text{CO}_2$  e forma compostos cimentantes, porém, fracos. Ambas as reações são importantes para este estudo pois tratam do aumento de resistência do solo (MARQUES, 2006).

Baldovino (2018) analisou misturas de solo-cal com 0, 3, 5, 7 e 9% de cal, com um tempo de cura de 15, 30, 60, 90 e 180 dias em três energias de compactação diferentes, sendo: A1 energia normal, A2 energia intermediária e A3 energia modificada. Ao final das análises, concluiu que as amostras com maiores teor de cal obtiveram um maior ganho de resistência nos ensaios de compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral. O Gráfico 1 e o Gráfico 2 apresentam os ganhos de resistência por teor de cal para o tempo de cura de 28 dias.

Gráfico 2 Relação entre teor de cal e resistência a tração por compressão diametral para tempo de cura de 60 dias



Fonte: Baldovino, 2018.

Fonte: Baldovino, 2018.

Como pode-se observar no Gráfico 1 e no Gráfico 2 as misturas que contêm maior teor de cal, ou seja, a amostra 3 (A3) possui um melhor desempenho mecânico

nas duas modalidades de compressão: simples e diametral. Esse comportamento do solo com adição de cal mostra-se como uma tendência já que a amostra 1 (A1) que contém menos cal que a amostra 2 (A2) possui uma resistência mecânica inferior em ambos os ensaios.

## 2.4 Solo e Cimento

O cimento, quando utilizado no solo, necessita apenas da umidade para desencadear as reações, ou seja, a estabilização se dá pela mistura homogênea de solo, cimento e água. A compactação e a cura da mistura também são importantes para obter-se os resultados desejados com a adição do cimento (MAKUSA, 2013). Segundo Brito (2017), a dosagem usada geralmente é determinada a partir de ensaios padronizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pela NBR 12253 (ABNT, 2016).

Quando o cimento entra em contato com a água inicia-se uma lenta reação de hidratação que tem como produto cristais de etringita (trissulfatoaluminato de cálcio hidratado), a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), e os silicatos de cálcio hidratado: a alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), a belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e o monossulfatoaluminato de cálcio hidratado. Os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) são os responsáveis pelo ganho de resistência do solo. Já a portlandita (hidróxido de cálcio) pode reagir com materiais pozolânicos disponíveis no solo e produzir mais silicato amorfo cimentante, diminuindo os espaços vazios e aumentando a resistência do solo (MAKUSA, 2013).

Segundo o DNIT (2006) solo-cimento é uma mistura que possui certos parâmetros a serem seguidos, como uma densidade específica, durabilidade e resistência, diferentemente do solo melhorado com cimento. Este é caracterizado pelo solo com uma pequena adição de cimento, 2 a 4%. A adição de 2 a 4% de cimento ao solo confere ao solo uma melhora da plasticidade e aumenta a resistência à água. Porém, Segundo SCHEUERMANN (2019) o uso de cimento Portland e cal é prejudicial ao meio ambiente por conta da utilização de recursos naturais e emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Além disso, o cimento Portland é um insumo com

alto valor agregado o que, muitas vezes, restringe a sua utilização para a estabilização de solos.

## 2.5 Solo e Pó de Vidro

### 2.5.1 Pó de Vidro

Durante o processo de produção das indústrias há a emissão de poluentes e a geração de lixo e resíduos e boa parte destes resíduos não são biodegradáveis. Uma das soluções atuais é a reciclagem e a reutilização. Para a produção do vidro, por exemplo, são necessários 560 quilogramas de areia, 190 quilogramas de carbonato, 146 quilogramas de calcário e 64 quilogramas de rochas dolomitas, por tonelada. Como o processo ocorre em altas temperaturas, há um elevado gasto energético e, conseqüentemente, grande liberação de gases nocivos ao meio ambiente (SCHEUERMANN, 2019).

Os vidros podem ser reciclados em vidros novos, porém boa parte do material acaba retornando contaminado por conta do processo de descarte, inviabilizando a reciclagem em vidros novos (IKARA, 2015). O vidro descartado em forma de garrafas e janelas possuem cerca de 75% de sílica na composição e segundo Ghasabkolaei et al (2017), boa parte das pesquisas que são publicadas sobre estabilização de solos, possuem presente no estudo a sílica, encontra principalmente no vidro (BENNY, 2017). Além disso, o pó de vidro proveniente da indústria também possui propriedades interessantes para a engenharia civil, como: alta permeabilidade, alta resistência ao esmagamento, pequena rigidez de tensão (IKARA, 2015).

O vidro é caracterizado como um material frágil, amorfo, cristalino e transparente. É composto majoritariamente pela sílica ( $\text{SiO}_2$ ), porém há outros elementos que fazem parte da composição do vidro e que podem variar. O Quadro 2 dispõe dos principais tipos de vidros produzidos e suas composições (SCHEUERMANN, 2019).

Quadro 2 - Classificação dos vidros quanto a composição

| <b>Tipo de Vidro</b>     | <b>Características</b>                                                                                                                                                      |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Soda - Cal</b>        | Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e/ou ao calor     |
| <b>Chumbo</b>            | Dotados de elevado índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes                      |
| <b>Boro-Silicatos</b>    | Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo |
| <b>Ópticos</b>           | Possuem alta densidade e grande índice de refração. Majoritariamente usados na fabricação de lentes e afins                                                                 |
| <b>Alumino-Silicatos</b> | Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão                                                                                                      |

Fonte: Scheuermann (2019).

O vidro mais comum, utilizado na produção de janelas, portas, garrafas é o sodo-cálcico. Esse tipo de vidro possui sílica e de 8 a 20% de óxido de cálcio (SCHEUERMANN, 2009).

### 2.5.2 Solo com Adição de Pó de Vidro

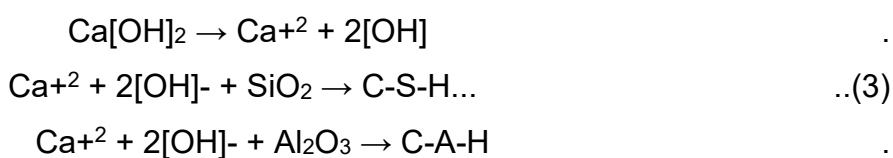
Segundo a ABNT (2004) o vidro é classificado como um resíduo de classe II B, ou seja, é um resíduo sólido não perigoso ao meio ambiente e inerte, ou seja, ele não lixivia. Então, ele pode ser utilizado na construção civil. Segundo SCHEUERMANN (2019), diversos autores já atestaram que o vidro possui atividade pozolânica por conta da sua composição e da estrutura amorfa, podendo substituir a adição dos materiais cimentícios ao solo. Na engenharia, os solos moles e argilosos

podem ser estabilizados por meio da adição de resíduos, como o vidro (BENNY, 2017).

O resíduo do vidro ainda não é utilizado na construção civil para a estabilização de solos, mas tem sido amplamente estudado. O passante da peneira 0,075 mm possui propriedade pozolânica de grande interesse para a engenharia civil (AFONSO, 2019).

A propriedade pozolânica do pó de vidro é a responsável pela sua efetividade no melhoramento de solos. Segundo Massaza (2004), pozolanas são caracterizadas como materiais inorgânicos compostos por sílica e alumínio e que quando em contato com Óxido de Cálcio na presença de umidade desencadeia reações que produzem compostos cimentícios

Apesar de existirem diferentes pozolanas, os produtos cimentantes são semelhantes. Portanto, pelo pó de vidro ser uma pozolana, quando entra em contato com um ambiente alcalino e úmido, passa por reações químicas e gera produtos cimentante: compostos ligantes hidratados à base de cálcio e sílica, como o C-S-H e o C-A-S-H (MASSAZA, 2004). As reações químicas da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representam o processo. Na primeira reação há a dissociação do óxido de cálcio na água, depois, as reações com a sílica e a alumina (SCHEUERMANN, 2009).



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho foi desenvolvido a partir de duas amostras de solos diferente da região de Curitiba. Primeiramente será realizada a caracterização dessas amostras, determinando alguns parâmetros que irão definir cada tipo de solo. Os resultados foram obtidos através de ensaios de resistência simples e resistência a tração por compressão diametral.

Foram produzidos um total de 84 corpos de prova, sendo 42 de cada amostra de solo. Destes, para cada composição de cal e pó de vidro serão produzidos 6 corpos de prova, sendo três destinados ao ensaio de compressão simples e três destinados ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Ao final, o resultado será obtido pela análise estatística através da média aritmética, desvio padrão, correção por student e erro e a comparação entre o valor encontrado entre os dois solos e a tendencia de comportamento de cada solo. A fim de concluir se a adição de pó de vidro e cal é útil ao melhoramento de solos.

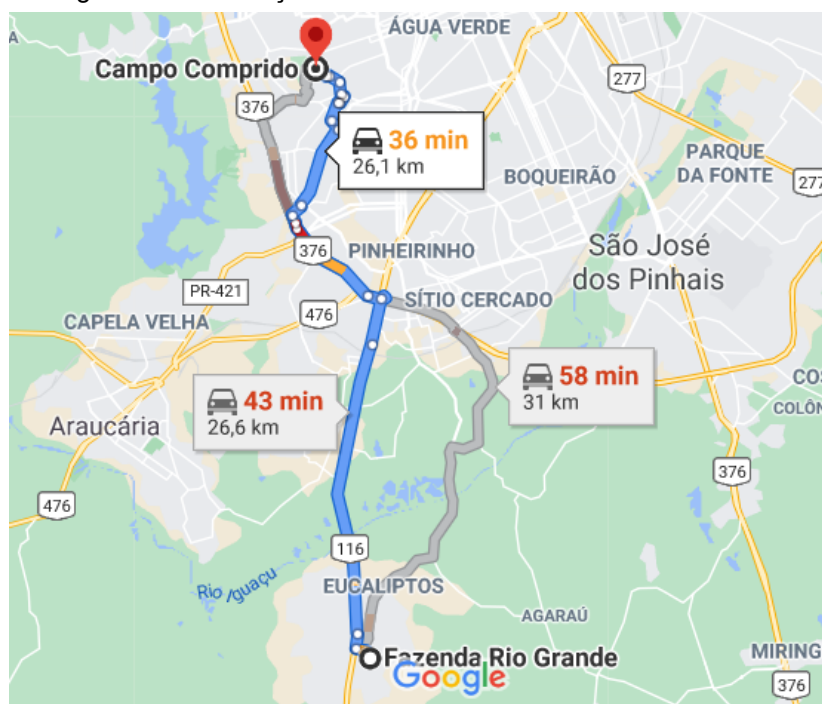
#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Solo**

No presente trabalho utilizou-se duas amostras diferentes da Formação Guabirota disponíveis no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville.

A amostra 1 corresponde à segunda camada da Formação Guabirota presente no bairro Campo Comprido em Curitiba. A amostra 2 corresponde ao solo da quarta camada da Formação Guabirota, presente na região metropolitana de Curitiba no município de Fazenda Rio Grande. Na Figura 5 pode-se observar as duas regiões das amostras e que a distância média é de 28 km.

Figura 5 - Localização do local das duas amostras



Fonte: Google Maps

Em uma análise primária diferencia-se as duas amostras pela coloração. O solo da amostra 1 possui uma coloração mais avermelhada e da amostra 2 mais rosada. Portanto, entende-se ao longo do trabalho como amostra 1 ou solo vermelho como a amostra retirada da segunda camada da Formação Guabirota e amostra 2 ou solo rosa como a amostra da quarta camada da Formação Guabirota.

### 3.1.2 Cal

A cal utilizada neste estudo foi uma cal hidratada dolomítica, composta por hidróxido de cálcio e magnésio que está disponível no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville. Esta cal é produzida em Almirante Tamandaré, região

metropolitana de Curitiba. Esse material foi escolhido por já ser utilizado em outras pesquisas realizadas no PPGEC-UTFPR.

### 3.1.3 Água

A água a ser utilizada para a realização dos ensaios e para a montagem dos corpos de prova foi a água destilada.

### 3.1.4 Pó de vidro

O pó de vidro que foi utilizado neste trabalho também será da amostra já presente no laboratório de Geotecnia da UTFPR campus Ecoville. Além disso, esse material foi escolhido por já ser utilizado em outras pesquisas realizadas no PPGEC-UTFPR. O vidro foi submetido a processos de destorroamento a fim de chegar à granulometria de 0,075 mm.

## 3.2 Metodologia

O intuito deste estudo é realizar a comparação entre o comportamento das duas amostras após a adição de cal e pó de vidro. Portanto, cada amostra não foi analisada precisamente com as mesmas condições, o ponto de interesse é a tendência de resultado dos ensaios finais.

### 3.2.1 Teor de cal e pó de vidro

O teor mínimo de cal que deve ser utilizado é de 3% em relação ao solo para se obter o ambiente alcalino suscetível para que corram as reações químicas. Portanto, foram determinados teores de cal superiores a 3%. Neste estudo, para amostra 1 e amostra 2 será utilizado 3%, 7% e 10% de cal.



O teor de pó de vidro utilizado para a amostra 1 foi de 5% de pó de vidro e para a amostra 2 foi de 2% e 5%. O Quadro 3 contém todos os traços que se utilizou neste estudo.

Quadro 3 - Teores de cal e pó de vidro para cada amostra e cada corpo de prova

| Solo      | Mistura   | Cal | Pó de Vidro | Quantidade de cp's |
|-----------|-----------|-----|-------------|--------------------|
| Amostra 1 | Solo puro | -   | -           | 3                  |
|           | M1.1      | 3%  | -           | 3                  |
|           | M1.2      | 7%  | -           | 3                  |
|           | M1.3      | 10% | -           | 3                  |
|           | M1.4      | 3%  | 5%          | 3                  |
|           | M1.5      | 7%  | 5%          | 3                  |
|           | M1.6      | 10% | 5%          | 3                  |
| Amostra 2 | Solo puro | -   | -           | 3                  |
|           | M2.1      | 3%  | 2%          | 3                  |
|           | M2.2      | 7%  | 2%          | 3                  |
|           | M2.3      | 10% | 2%          | 3                  |
|           | M2.4      | 3%  | 5%          | 3                  |
|           | M2.5      | 7%  | 5%          | 3                  |
|           | M2.6      | 10% | 5%          | 3                  |
| Total     |           |     |             | 42                 |

Fonte: Autora (2021).

### 3.2.2 Tempo de cura

O tempo de cura dos corpos de prova dos ensaios de tração e compressão foram definidos com o intuito de acompanhar a evolução das reações de cimentação ocorrem, baseando-se em períodos de curto, médio e longo prazo. Para a amostra 1 será realizado o tempo de cura de 7, 28 e 90 dias e para a amostra 2 será de 7, 28 e 60 dias.

### 3.2.3 Análise estatística

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral foram submetidos análise estatística

para maior confiabilidade nas comparações. Os ensaios foram realizados em triplicata, ou seja, 3 amostras. Para definir os resultados utilizou-se da média aritmética ( $\bar{x}$ ) conforme a Equação 4 para determinar os valores.

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_i)}{n} \quad (4)$$

Sendo  $x_i$  os valores de cada dado e  $n$  o número de dados da amostra. Os resultados são dados lineares e calcula-se o desvio padrão de cada amostra conforme a Equação 5.

$$\sigma p = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Com o desvio padrão calculado, corrigiu os valores por *t-student*. Como estamos tratando de uma amostra pequena de 3 dados, utilizou-se o fator tabelado de correção de 1,320 para 68% de confiança. O desvio padrão corrigido ( $\sigma pc$ ), nada mais é do que a multiplicação do desvio padrão ( $\sigma p$ ) pelo fator de correção.

Feito isso, calculou-se o desvio médio ( $\sigma m$ ) conforme a Equação 6. E sabe-se ainda que o erro sistemático foi considerado 0. Portanto o erro total tem o valor equivalente ao desvio padrão médio.

$$\sigma m = \frac{\sigma pc}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Então, agora sabe-se a média dos resultados e o erro, o que permite uma comparação mais precisa dos resultados obtidos dos ensaios dos dois tipos de solo.

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA), que é o processo de decomposição da variação total nas componentes explicadas e não explicadas ou residuais. Esta decomposição segue a disposição apresentada na Tabela.....

Tabela – Análise de Variância

Tabela 1 - Análise de Variância

| Fonte de Variação | Soma dos Quadrados          | Graus de Liberdade | Quadrados Médios                        | Função F de Snedecor                                                             |
|-------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Explicada         | $\sum(Y_{est} - Y_{med})^2$ | $k$                | $\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k}$   |                                                                                  |
| Não Explicada     | $\sum(Y - Y_{est})^2$       | $(n - k - 1)$      | $\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$ | $\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k} \div \frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$ |
| Total             | $\sum(Y - Y_{med})^2$       | $(n - 1)$          |                                         |                                                                                  |

Fonte: Autora (2021)

Neste trabalho, para determinação da Análise de Variância foi utilizado o software Statgraphics® Centurion XVI.

Uma vez que as variâncias apresentassem diferenças significativas, é importante determinar quais grupos de médias, em particular, são importantes. Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento denominado Multiple Range Test, através do teste de Tukey-Kramer, mediante o uso do mesmo software.

### 3.3 Caracterização dos Solos

Para a caracterização de cada amostra de solo é necessário a realização de ensaios padronizados pela ABNT, como: ensaio de granulometria, massa específica real dos grãos, limite de liquidez, limite de plasticidade e compactação.

Segundo a ABNT (ABNT, 2016) cada ensaio de caracterização e o ensaio de compactação necessita de uma preparação específica da amostra. Todas as considerações e as necessidades de cada ensaio encontram-se na norma e seguiu-se todas as orientações para a realização dos ensaios deste trabalho.

### 3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica é realizada com base na norma NBR 7181. O ensaio de peneiramento fino e grosso é executado com o auxílio de um agitador mecânico e com peneiras de 0,075 mm até 1,2 mm para o peneiramento fino e, para o peneiramento grosso, com peneiras de 4,8 mm até 50 mm, conforme orienta a norma. Além disso pode-se optar pelo método com lavagem e sem lavagem de material.

O resultado do ensaio é reproduzido graficamente, nas abscissas os diâmetros das partículas em escala logarítmica e nas ordenadas as porcentagens das partículas passantes (ABNT, 2016).

Os resultados da análise granulométrica serão obtidos a partir das pesquisas feitas por Pereira (2020)<sup>1</sup> e Pudell (2021)<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Limites de Attenberg

Para os ensaios de limite de Attenberg das 14 misturas foram preparadas conforme orienta a NBR 6457 (ABNT, 2016). O limite de Attenberg corresponde ao ensaio de Limite de liquidez e ao de plasticidade. O limite de liquidez (LL) é determinado pela NBR 6459 e irá determinar o nível de umidade em que o material passa de plástico para líquido. Já o limite de plasticidade, regido pela NBR 7180, avalia o nível de água para a transição do material de semissólido para plástico.

Com esses dois resultados pode-se avaliar o potencial argiloso do material por meio do índice de plasticidade, determinado pela subtração do limite de plasticidade do limite de liquidez (ABNT, 2016).

---

<sup>1</sup> PEREIRA. M. D. (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba) Comunicação pessoal, 2020

<sup>2</sup> PUDELL. P.C.A. (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba) Comunicação pessoal, 2021

### 3.3.3 Massa específica real dos grãos

O ensaio para determinar a massa específica real dos grãos foi realizado conforme a norma DNER-ME 093 (BRASIL, 1994). Para a amostra 1 e 2 foram realizados ensaios de massa específica real dos grãos para o solo, a cal, o vidro e cada mistura de cada amostra.

## 3.4 Compactação

As amostras para a realização do ensaio de compactação devem ser preparadas conforme a NBR 6457 (ABNT,2016).

Foram realizados 4 e, quando se julgou necessário, 5 ensaios de compactação para cada uma das misturas solo-cal. Para o ensaio de compactação da amostra 1 foi realizado sem reuso de material e para a amostra 2 foi realizado o ensaio de compactação com reuso de material, ambos seguindo os procedimentos normativos da NBR 7182.

O ensaio de compactação para as duas amostras foi realizado pela energia normal com o cilindro pequeno, soquete pequeno, sendo 3 camadas da mistura e 26 golpes por camada (ABNT, 2016). Para a amostra 1 e 2 foi utilizado 2,5 kg de solo para cada traço.

Após cada camada o solo é escarificado e na última ele é rasado com o auxílio de uma régua metálica e espátulas, visando o ajuste do volume de material ao volume do cilindro.

Foram separadas 6 cápsulas de cada mistura para a obtenção do real valor do teor de umidade. A cada ponto foi incrementado 3% do teor de umidade e esses dados, assim como o peso do corpo de prova compactado foram utilizados para a produção dos resultados.

Os resultados foram expressos pela curva de compactação com o teor de umidade representado na abscissa e com os valores da massa específica seca nas

ordenadas. A partir da curva de compactação determinou-se a umidade ótima de compactação para a moldagem dos corpos de prova.

### **3.5 Compressão Simples e a Tração**

Para a comparação dos efeitos da adição do pó de vidro e cal ao solo, serão realizados os ensaios de compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral com o intuito de avaliar o ganho de resistência mecânica das misturas.

Todos os corpos de prova foram moldados com base no teor de umidade ótimo obtido na curva de compactação Proctor. De forma a tornar o estudo mais preciso, cada traço terá seis corpos, sendo três para a compressão simples e três para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral. O resultado será a média aritmética dos três valores obtidos para cada ensaio. Os corpos de prova foram rompidos conforme o tempo de cura e seguindo as orientações normativas presentes na NBR 12770 para a compressão simples e NBR 7222 para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (ABNT, 1992 ; ABNT, 2016)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são dispostos os resultados da caracterização do solo, do ensaio de compactação e dos ensaios de resistência mecânica. Na análise granulométrica o solo rosa apresentou-se predominantemente siltoso e o solo vermelho silte-argiloso. Quanto aos Limite de Attenberg, o solo vermelho possui limite de plasticidade de 42,00% e limite de liquidez de 47,80%, já o solo rosa apresentou-se menos plástico que o solo vermelho, sendo o limite de liquidez de 54,70% e o limite de plasticidade de 33,57%. A massa específica real dos grãos do solo vermelho é de 2,685 g/m<sup>3</sup> e do solo rosa de 2,660 g/m<sup>3</sup>. Para a compactação, a umidade ótima do solo vermelho, mais argiloso, é de 30,72% e do solo rosa, siltoso, de 36,40%.

### 4.1 Caracterização dos Materiais

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais da amostra 1 foram baseados na pesquisa realizada por Pereira (2020)<sup>1</sup>. Já os ensaios da amostra 2, foram realizados em laboratório e esses resultados serão apresentados a seguir, com exceção da análise granulométrica da amostra que será utilizado o resultado obtido a partir da pesquisa realizada por Pudell (2021)<sup>2</sup>.

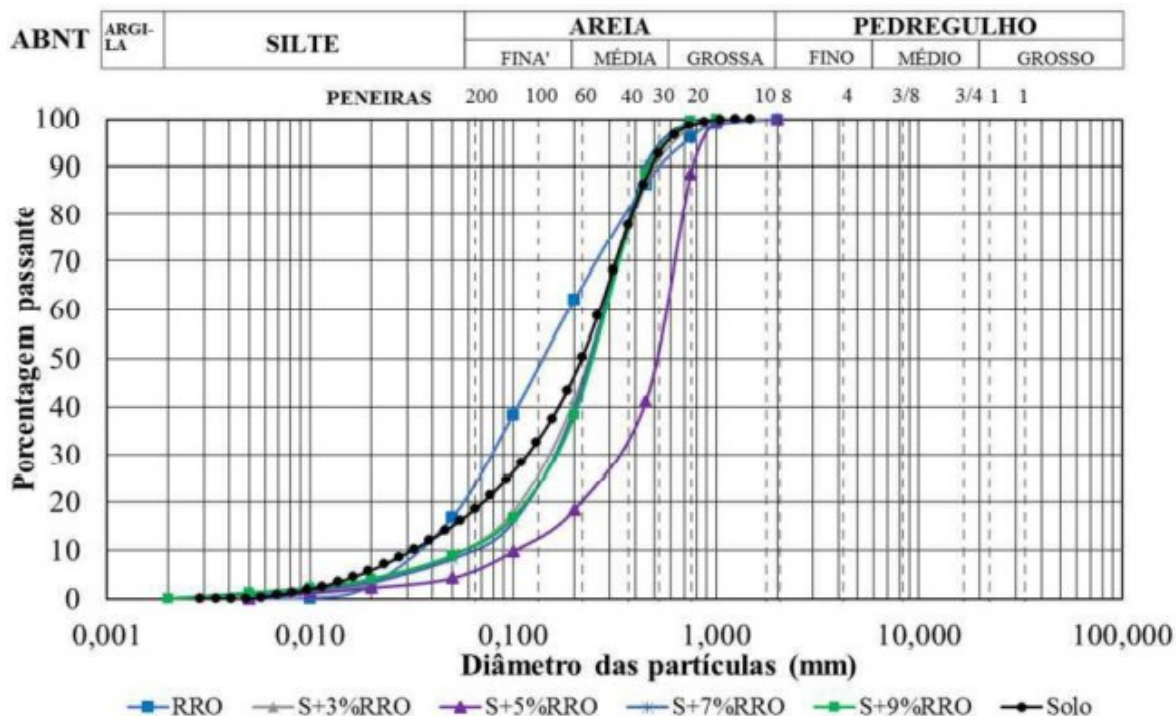
#### 4.1.1 Análise granulométrica

A composição granulométrica de cada solo foi utilizada conforme os dados obtidos por Pereira (2020)<sup>1</sup> para o solo vermelho e por Pudell (2021)<sup>2</sup> para o solo rosa. Ambos os ensaios foram realizados com lavagem do material.

O solo vermelho é composto por 39% de Argila ( $\phi < 0,002$  mm), 33% de Silte ( $0,002$  mm  $< \phi < 0,06$  mm) e Areia ( $0,06$  mm  $< \phi < 2$  mm) 28% (PEREIRA, 2020)<sup>1</sup>. Os resultados correspondem a um solo composto por materiais finos, corroborando com

os solos da Formação Guabirotuba e a curva granulométrica pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Curva granulométrica solo vermelho com lavagem

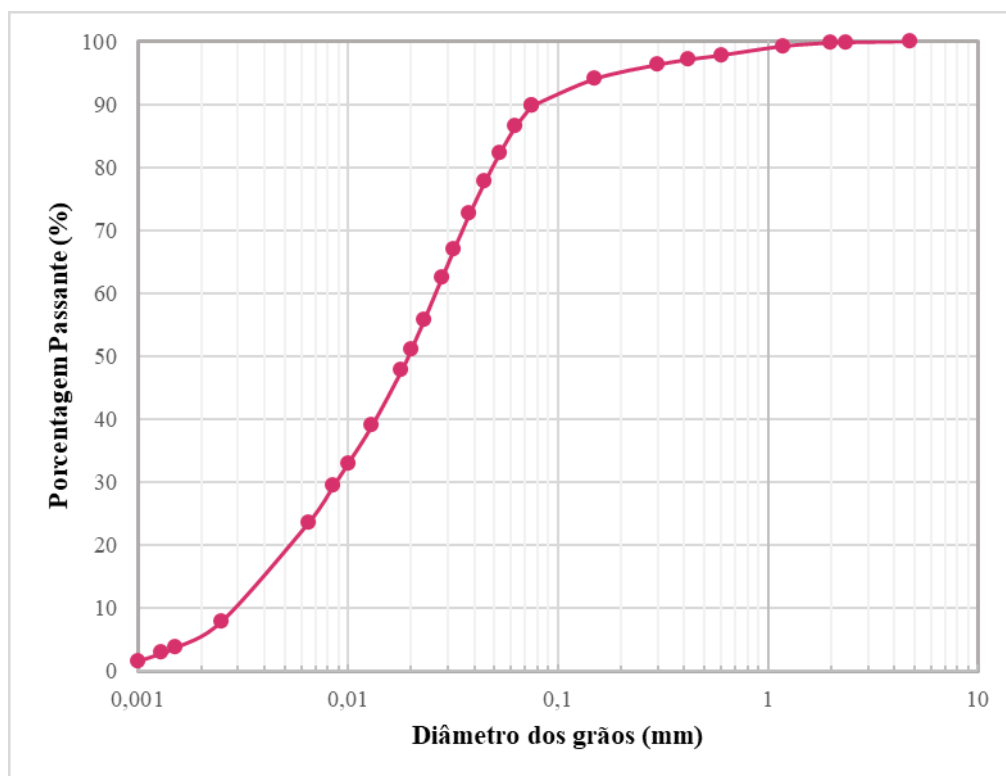


Fonte: Pereira (2020)<sup>1</sup>

O solo rosa é composto por composto por 0,70 % pedregulho ( $2 \text{ mm} < \phi < 60 \text{ mm}$ ), 1,97% de areia grossa ( $0,6 \text{ mm} < \phi < 2 \text{ mm}$ ), 9,75% de areia média ( $0,2 \text{ mm} < \phi < 0,6 \text{ mm}$ ), 7,53% de areia fina ( $0,06 \text{ mm} < \phi < 0,2 \text{ mm}$ ), 78,54% de silte ( $0,002 \text{ mm} < \phi < 0,06 \text{ mm}$ ) e 7,97% é composto por argila ( $\phi < 0,002 \text{ mm}$ ), classificando-se como um solo argilo siltoso (PUDELL, 2021)<sup>2</sup>. Dessa forma, a curva granulométrica do solo rosa pode ser observada na Figura 7.



Figura 7 - Curva granulométrica do solo rosa com lavagem



Fonte: Pudell (2021)<sup>2</sup>

#### 4.1.2 Limites de Attenberg

Neste item é descrito os resultados encontrados no ensaio de limites de Attenberg da amostra 2 e os resultados utilizados a partir de Pereira (2020)<sup>1</sup> para a amostra 1.

A amostra de solo 1 corresponde ao solo vermelho e os resultados da caracterização do material são conforme Pereira (2020)<sup>1</sup>.

Os ensaios foram realizados a partir de tréplicas de cada traço e os resultados foram obtidos considerando a média aritmética dos três resultados de cada traço. (PEREIRA, 2020)<sup>1</sup>.

O limite de plasticidade do solo vermelho é de 42,00% e o limite de liquidez 47,80%. Portanto, o índice de plasticidade é de 5,80% (PEREIRA, 2020)<sup>1</sup>.

O ensaio do solo rosa foi realizado em laboratório. Foram analisadas seis amostras para o LL e quatro amostras para o LP e o resultado foi obtido por meio da média aritmética.

Na Figura 8 observa-se a o equipamento utilizado para a realização do ensaio de limite de liquidez do solo. Foram coletadas 3 partes diferentes dessa amostra e, então, determinado o valor do LL.

Figura 8 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de Limite de Liquidez da amostra 2



Fonte: Autora (2021)

Já na Figura 8 pode-se observar a realização do ensaio de limite de plasticidade.

Figura 8 - Realização do ensaio de LP do solo rosa



Fonte: Autora (2021)

Para o solo rosa foi encontrado o limite de liquidez de 54,70% e o limite de plasticidade de 33,57%. Ou seja, a umidade atingida aos 25 golpes para o LL e a umidade encontrada na amostra de solo moldada conforme gabarito ao aparecer as primeiras fissuras. Portanto, o índice de plasticidade do solo rosa é de 21%.

#### 4.1.3 Massa específica real dos grãos

Será abordado neste item os resultados da massa específica real dos grãos do solo vermelho obtidos a partir de Pereira (2020)<sup>1</sup> e do solo rosa, da cal e do pó de vidro, obtidos por meio dos ensaios realizados em laboratório.

O solo vermelho possui uma massa específica real dos grãos ( $G_s$ ) de 2,685  $g/m^3$  (PEREIRA,2020)<sup>1</sup>.

Já o ensaio do solo rosa, da cal e do pó de vidro foi realizado em laboratório. Analisou-se a massa específica real dos grãos ( $G_s$ ) para cada material utilizado. Foram produzidas 3 unidades de ensaio e ensaiadas 2 amostras por vez. O resultado é a média aritmética dos três valores obtidos, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Ensaio de Gs do solo rosa



Fonte: Autora (2021)

Foi utilizado uma máquina de vácuo para que o material + água destilada dentro dos balões volumétricos não sofressem interferência do ar na obtenção dos resultados. O equipamento utilizado está representado na Figura 10

Figura 10 – Processo da retirada do ar dos balões volumétricos



Fonte: Autora (2021)

Os resultados obtidos a partir do ensaio realizado estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica real do grão de cada material

| <b>Amostra</b> | <b>G<sub>s</sub> (g/m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------|----------------------------------------|
| Solo rosa      | 2,660                                  |
| Cal            | 2,425                                  |
| Pó de vidro    | 2,326                                  |

Fonte: Autor (2021)

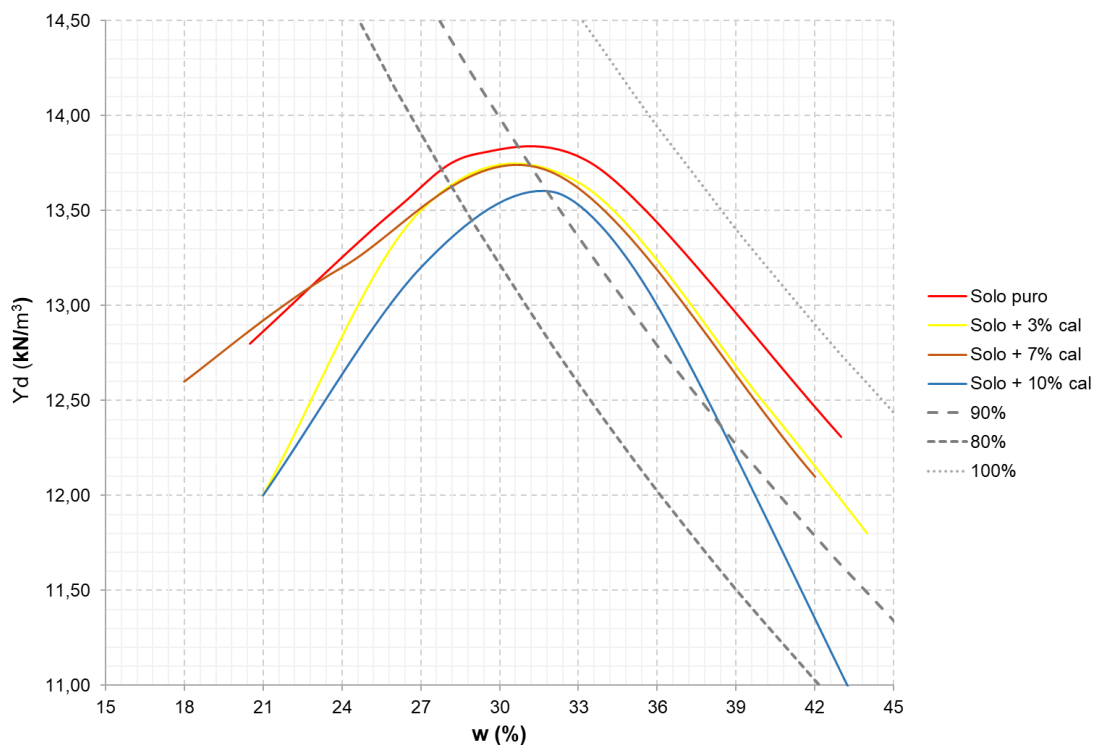
Observa-se que o solo vermelho possui maior densidade real do grão do que o solo rosa.

## 4.2 Compactação

### 4.2.1 Solo vermelho

O ensaio de compactação da amostra 1 foi realizado com 3%, 7% e 10% de cal. As curvas de compactação foram construídas a partir de 5 pontos e então, determinado os pontos de umidade ótima para a realização dos corpos de prova. Observa-se no Gráfico 3 as curvas de compactação do solo, solo+3% cal, solo+7% cal e solo+10% cal com as linhas de saturação de 80, 90 e 100%.

Gráfico 3 - Curvas de compactação do solo vermelho



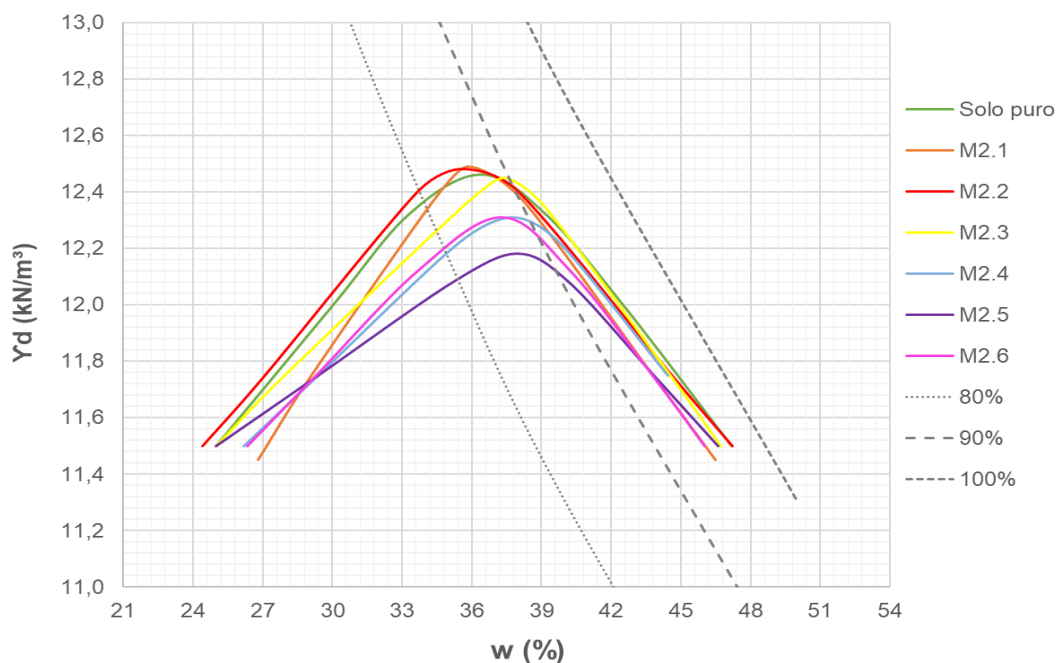
Fonte: Autora (2020) e Pereira (2020)<sup>1</sup>

Para o solo puro observa-se uma umidade de 30,72%, já para a mistura solo +3% de cal observa-se uma umidade ótima de 31,90%, para solo + 7% de cal tem-se uma umidade ótima de 29,02% e para solo + 10% de cal observa-se uma umidade ótima de 31%.

#### 4.2.2 Solo rosa

O ensaio de compactação da amostra 2 foi realizado para cada mistura de cal e pó de vidro. As curvas de compactação foram construídas a partir de 5 ensaios e então, determinado os pontos de umidade ótima para a realização dos corpos de prova. Observa-se no Gráfico 4 as curvas de compactação das 7 misturas da amostra 2 com as linhas de saturação de 80, 90 e 100%.

Gráfico 4 - Curvas de compactação do solo rosa



Fonte: Autora (2021) e Pudell (2021)<sup>2</sup>

Para o solo observa-se uma umidade ótima de 36,40%, para a M2.1 observa-se uma umidade ótima de 35,85%, para a M2.2 observa-se uma umidade ótima de 35,52%, para a M2.3 observa-se uma umidade ótima de 37,36%, a M2.4 possui uma umidade ótima de 37,76%, para a M2.5 observa-se uma umidade ótima de 37,96% e para a M2.6 observa-se uma umidade ótima de 37,28%.

### 4.3 Compressão Simples

Os itens a seguir contém os resultados dos ensaios de compressão simples dos dois solos das amostras curadas entre 7 e 90 dias. Os resultados foram desenvolvidos com o auxílio no Microsoft Excel, assim como os gráficos que foram plotados no mesmo software.

#### 4.3.1 Solo vermelho

Foram rompidos um total de 57 corpos de prova conforme a Figura 11, divididos em tempo de cura de 7 dias, 28 dias e 90 dias. Cada mistura corresponde a 3 corpos de prova.

Figura 11 - Ensaio de compressão simples do solo vermelho

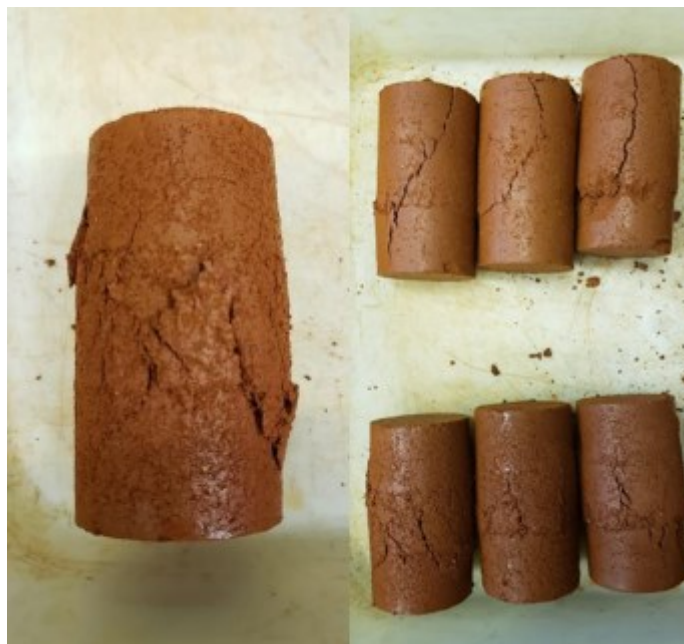


Fonte: Autora (2020)

Após os corpos de prova passarem o tempo determinado de cura, eles foram pesados e em seguida levados ao ensaio. O padrão de rompimento no ensaio de compressão simples ocorre horizontalmente em relação a prensa, conforme Figura 12.



Figura 12 - Corpo de prova após o rompimento no ensaio de compressão simples



Fonte: Autora (2020)

Pode-se observar na Tabela 3 os resultados do ensaio de compressão simples realizado após 7 dias de cura das misturas. Assim como todos os cálculos estatísticos realizados.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 7 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)            |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 35,936<br>37,219<br>48,730    | 40,629             | 7,046                      | 9,307                   | 5,37                        | 40,629 $\pm$<br>5,37   |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 40,942<br>43,646<br>44,794    | 43,127             | 1,978                      | 2,613                   | 1,51                        | 43,127 $\pm$<br>1,51   |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 148,947<br>153,457<br>151,853 | 151,419            | 2,286                      | 3,019                   | 1,74                        | 151,419 $\pm$<br>1,74  |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 211,386<br>204,571<br>200,455 | 205,471            | 5,521                      | 7,293                   | 4,21                        | 205,471 $\pm$<br>4,21  |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 52,673<br>50,013<br>25,668    | 42,785             | 14,883                     | 19,661                  | 11,35                       | 42,785 $\pm$<br>11,35  |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 143,060<br>169,529<br>163,967 | 158,852            | 13,956                     | 18,436                  | 10,64                       | 158,852 $\pm$<br>10,64 |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 256,526<br>249,487<br>261,346 | 255,786            | 5,964                      | 7,878                   | 4,55                        | 255,786 $\pm$<br>4,55  |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Análise de variância do solo vermelho para 7 dias de cura

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 137789,            | 6  | 22964,8          | 297,08                      | 0,0000  |
| Não Explicada     | 1082,21            | 14 | 77,3005          |                             |         |
| Total             | 138871,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho 7 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 40,6283 | A                  |
| M1-4       | 3          | 42,7847 | A                  |
| M1-1       | 3          | 43,1273 | A                  |
| M1-2       | 3          | 151,419 | B                  |
| M1-5       | 3          | 158,852 | B                  |
| M1-3       | 3          | 205,471 | C                  |
| M1-6       | 3          | 255,786 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M1.2, sendo um ganho de 372% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M1.6 apresenta um ganho de 629% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Já na Tabela 6 observa-se os resultados do ensaio de compressão simples das misturas após 28 dias de cura úmida.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 28 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 35,936<br>37,219<br>48,730    | 40,629             | 7,046                      | 9,307                   | 5,37                        | 40,629 $\pm$ 5,37   |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 70,602<br>79,428<br>68,310    | 72,780             | 5,871                      | 7,755                   | 4,48                        | 72,780 $\pm$ 4,48   |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 239,808<br>239,089<br>232,697 | 237,198            | 3,914                      | 5,171                   | 2,99                        | 237,198 $\pm$ 2,99  |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 322,193<br>322,193<br>315,802 | 320,063            | 3,690                      | 4,875                   | 2,81                        | 320,063 $\pm$ 2,81  |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 67,155<br>66,750<br>68,035    | 67,314             | 0,657                      | 0,868                   | 0,50                        | 67,314 $\pm$ 0,50   |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 270,044<br>250,599<br>309,410 | 276,684            | 29,963                     | 39,580                  | 22,85                       | 276,684 $\pm$ 22,85 |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 404,024<br>345,201<br>368,221 | 372,482            | 29,642                     | 39,158                  | 22,61                       | 372,482 $\pm$ 22,61 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de variância para o solo vermelho e 28 dias de cura

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 331787,            | 6  | 55297,8          | 204,82                      | 0,0000  |
| Não Explicada     | 3779,75            | 14 | 269,982          |                             |         |
| Total             | 335567,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Teste Turkey-Kramer para o solo vermelho e 28 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 40,6283 | A                  |
| M1-4       | 3          | 67,3133 | A                  |
| M1-1       | 3          | 72,78   | A                  |
| M1-2       | 3          | 237,198 | B                  |
| M1-5       | 3          | 276,684 | BC                 |
| M1-3       | 3          | 320,063 | C                  |
| M1-6       | 3          | 372,482 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M1.2, sendo um ganho de 583% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M1.6 apresenta um ganho de 916% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

A Tabela 9 contém os resultados dos corpos de prova rompidos na compressão simples após 90 dias de cura úmida.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 90 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 35,936<br>37,219<br>48,730    | 40,629             | 7,046                      | 9,307                   | 5,37                        | 40,629 $\pm$ 5,37   |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 110,618<br>123,233<br>113,247 | 115,700            | 6,655                      | 8,792                   | 5,08                        | 115,700 $\pm$ 5,08  |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 392,309<br>449,882<br>381,113 | 407,768            | 36,899                     | 48,744                  | 28,14                       | 407,768 $\pm$ 28,14 |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 478,803<br>351,273<br>485,541 | 438,539            | 75,650                     | 99,933                  | 57,70                       | 438,539 $\pm$ 57,70 |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 197,288<br>175,643<br>134,307 | 169,080            | 31,999                     | 42,271                  | 24,41                       | 169,080 $\pm$ 24,41 |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 496,705<br>493,428<br>575,658 | 521,930            | 46,558                     | 61,503                  | 35,51                       | 521,930 $\pm$ 35,51 |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 699,365<br>635,418<br>639,268 | 658,017            | 35,860                     | 47,371                  | 27,35                       | 658,017 $\pm$ 27,35 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de variância do solo vermelho e 90 dias de cura

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 952708,            | 6  | 158785,          | 95,36                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 23311,8            | 14 | 1665,13          |                             |         |
| Total             | 976020,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Análise da variância para o solo vermelho e 7 dias de cura

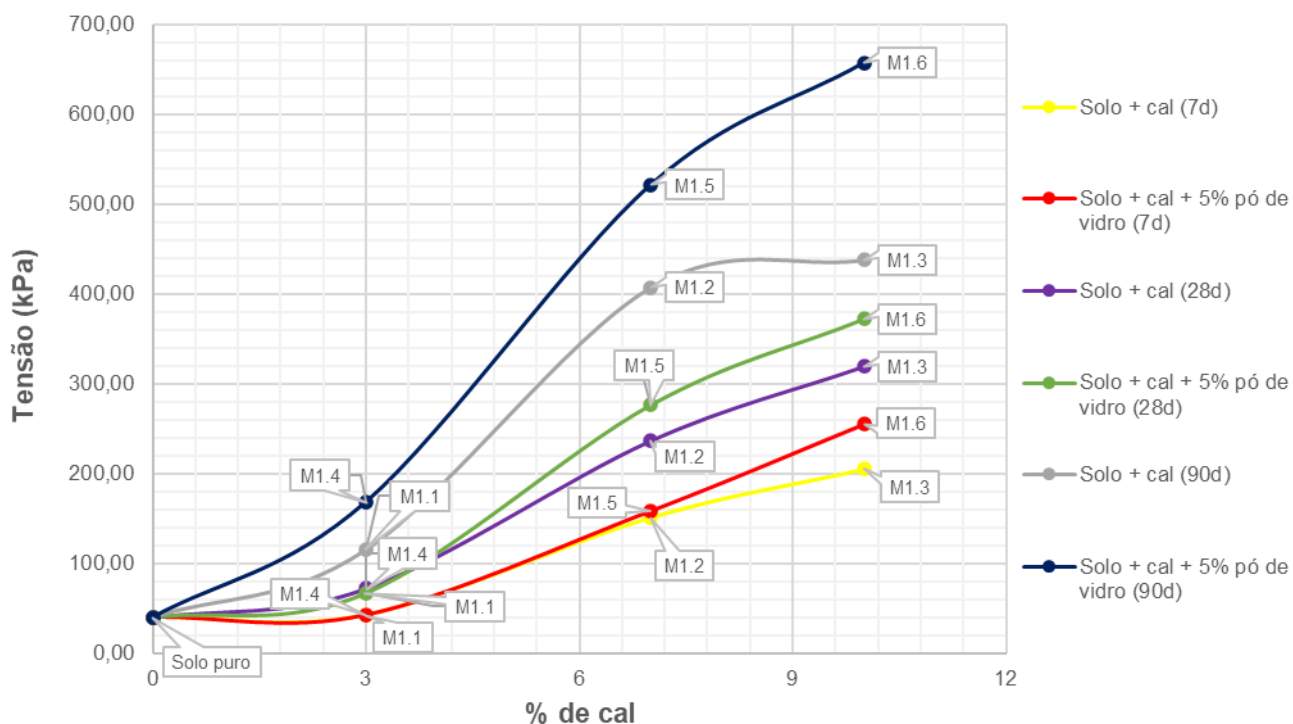
| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 40,6283 | A                  |
| M1-1       | 3          | 115,699 | AB                 |
| M1-4       | 3          | 169,079 | AB                 |
| M1-2       | 3          | 407,768 | B                  |
| M1-3       | 3          | 438,539 | BC                 |
| M1-5       | 3          | 521,93  | C                  |
| M1-6       | 3          | 658,017 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M1.2, sendo um ganho de 1002% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M1.6 apresenta um ganho de 1618% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Observa-se no Gráfico 5, há um aumento na resistência mecânica do solo conforme a adição de cal nas misturas M1.1, M1.2 e M1.3 em relação ao solo puro. Além disso a mistura M1.6 difere da M1.3 pela adição de 5% de cal, o que provocou um aumento na resistência mecânica da mistura

Gráfico 5 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 90 dias de cura



Fonte: Autora (2020)

Portanto, o aumento de teor de cal e a adição de pó de vidro ao solo vermelho provoca uma tendência de aumento de resistência a compressão simples ao solo. Além disso, observa-se no Gráfico 5 o ganho de resistência mecânica de cada mistura com o aumento do tempo de cura, evidenciando o acontecimento das reações de cimentação.

#### 4.3.2 Solo rosa

Para o solo rosa foram rompidos um total de 57 corpos de prova conforme a Figura 11, divididos em tempo de cura de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Cada mistura corresponde a 3 corpos de prova.



Figura 13 - Ensaio de compressão simples do solo vermelho



Fonte: Autora (2020)

Após os corpos de prova passarem o tempo determinado de cura, eles foram pesados e em seguida levados ao ensaio.

Pode-se observar na Tabela 12 os resultados do ensaio de compressão simples realizado após 7 dias de cura das misturas.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 7 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa) | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)        |
|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 119,777      | 116,608            | 3,529                      | 4,661                   | 2,69                        | 116,608 $\pm$ 2,69 |
|                                       |           | 117,242      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 112,806      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 123,579      | 124,530            | 6,862                      | 9,065                   | 5,23                        | 124,53 $\pm$ 5,23  |
|                                       |           | 118,193      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 131,818      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 102,983      | 113,017            | 9,305                      | 12,292                  | 7,10                        | 113,02 $\pm$ 7,10  |
|                                       |           | 114,707      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 121,362      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 191,073      | 191,707            | 7,309                      | 9,655                   | 5,57                        | 191,71 $\pm$ 5,57  |
|                                       |           | 184,736      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 199,312      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 212,620      | 210,191            | 13,005                     | 17,179                  | 9,92                        | 210,19 $\pm$ 9,92  |
|                                       |           | 196,143      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 221,809      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 171,110      | 159,808            | 16,140                     | 21,321                  | 12,31                       | 159,81 $\pm$ 12,31 |
|                                       |           | 166,991      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 141,324      |                    |                            |                         |                             |                    |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 160,970      | 179,349            | 15,967                     | 21,092                  | 12,18                       | 179,35 $\pm$ 12,18 |
|                                       |           | 189,806      |                    |                            |                         |                             |                    |
|                                       |           | 187,270      |                    |                            |                         |                             |                    |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Análise de variância do solo rosa e 7 dias de cura

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 27478,2            | 6  | 4579,69          | 36,26                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 1768,18            | 14 | 126,298          |                             |         |
| Total             | 29246,3            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Análise da variância para o solo rosa e 7 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| M2-2       | 3          | 113,017 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 116,608 | A                  |
| M2-1       | 3          | 124,53  | A                  |
| M2-5       | 3          | 159,808 | B                  |
| M2-6       | 3          | 179,349 | BC                 |
| M2-3       | 3          | 191,707 | C                  |
| M2-4       | 3          | 210,191 | C                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M2.5, sendo um ganho de 140% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 185% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Já na Tabela 15 observa-se os resultados do ensaio de compressão simples das misturas após 28 dias de cura úmida.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 28 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa) | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 119,460      | 104,462            | 15,052                     | 19,883                  | 11,48                       | 104,462 $\pm$ 11,48 |
|                                       |           | 104,567      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 89,358       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 70,345       | 78,690             | 7,514                      | 9,926                   | 5,73                        | 78,69 $\pm$ 5,73    |
|                                       |           | 84,921       |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 80,802       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 73,197       | 72,775             | 9,513                      | 12,567                  | 7,26                        | 72,77 $\pm$ 7,26    |
|                                       |           | 63,057       |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 82,070       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 141,324      | 136,677            | 10,616                     | 14,023                  | 8,10                        | 136,68 $\pm$ 8,10   |
|                                       |           | 144,176      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 124,530      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 137,205      | 141,958            | 6,906                      | 9,123                   | 5,27                        | 141,96 $\pm$ 5,27   |
|                                       |           | 149,880      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 138,789      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 165,090      | 159,808            | 16,795                     | 22,186                  | 12,81                       | 159,81 $\pm$ 12,81  |
|                                       |           | 173,328      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 141,007      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 201,213      | 200,473            | 1,857                      | 2,453                   | 1,42                        | 200,47 $\pm$ 1,42   |
|                                       |           | 201,847      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 198,361      |                    |                            |                         |                             |                     |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Análise de variância do solo rosa e 28 dias de cura

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 441757,            | 6  | 73626,2          | 137,99                      | 0,0000  |
| Não Explicada     | 7469,99            | 14 | 533,571          |                             |         |
| Total             | 449227,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Análise da variância para o solo rosa e 28 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| M2-2       | 3          | 85,4493 | A                  |
| M2-1       | 3          | 102,666 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 104,25  | A                  |
| M2-3       | 3          | 297,013 | B                  |
| M2-4       | 3          | 361,022 | BC                 |
| M2-5       | 3          | 374,541 | C                  |
| M2-6       | 3          | 467,807 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M2.3, sendo um ganho de 347% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 547% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

A Tabela 18 contém os resultados dos corpos de prova rompidos na compressão simples após 60 dias de cura úmida.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo rosa com 60 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)        |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 87,773<br>85,238<br>83,337    | 85,449             | 2,226                      | 2,940                   | 1,70                        | 85,449 $\pm$ 1,70  |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 112,489<br>95,378<br>100,131  | 102,666            | 8,833                      | 11,668                  | 6,74                        | 102,67 $\pm$ 6,74  |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 99,814<br>103,617<br>109,320  | 104,250            | 4,785                      | 6,321                   | 3,65                        | 104,25 $\pm$ 3,65  |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 271,241<br>309,583<br>310,216 | 297,013            | 22,322                     | 29,487                  | 17,02                       | 297,01 $\pm$ 17,02 |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 358,698<br>371,056<br>353,311 | 361,021            | 9,098                      | 12,018                  | 6,94                        | 361,02 $\pm$ 6,94  |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 404,644<br>380,562<br>338,418 | 374,541            | 33,521                     | 44,281                  | 25,57                       | 374,54 $\pm$ 25,57 |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 517,133<br>433,162<br>453,125 | 467,807            | 43,868                     | 57,950                  | 33,46                       | 467,81 $\pm$ 33,46 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 19

Tabela 19 - Análise de variância do solo rosa para 60 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 344579,            | 6  | 57429,8          | 41,59                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 19332,6            | 14 | 1380,9           |                             |         |
| Total             | 363911,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 20.

Tabela 20 - Análise da variância do solo rosa e 60 dias

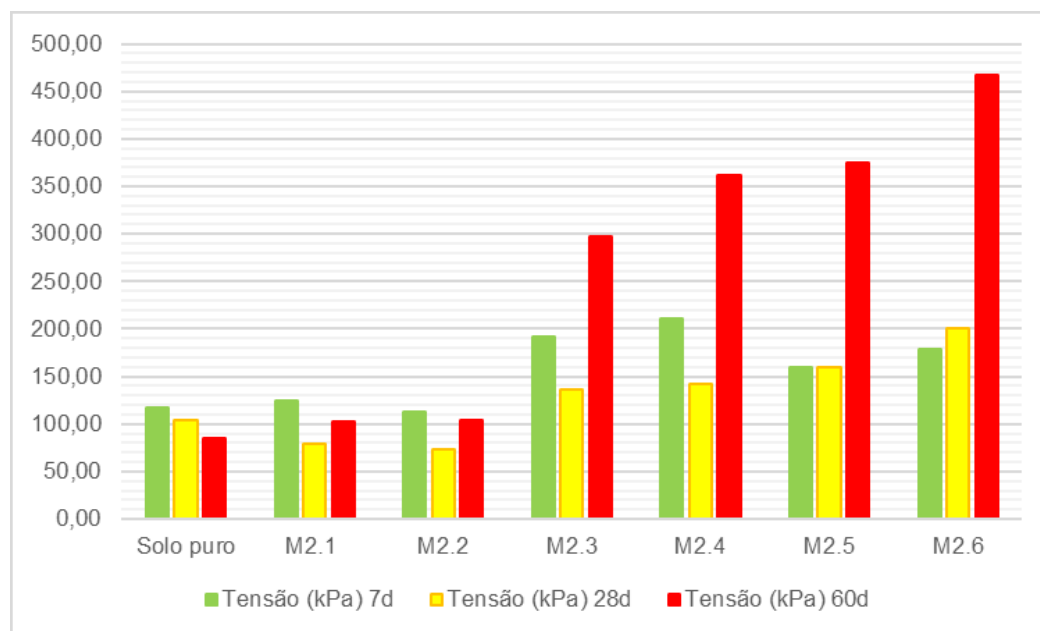
| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 2     | 3          | 85,4493 | A                  |
| M2-1       | 3          | 102,666 | A                  |
| M2-2       | 3          | 104,25  | A                  |
| M2-3       | 3          | 297,013 | B                  |
| M2-4       | 3          | 361,022 | BC                 |
| M2-5       | 3          | 374,541 | C                  |
| M2-6       | 3          | 467,807 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M2.3, sendo um ganho de 347% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 547% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Observa-se no Gráfico 6 que as misturas de cal e 2% de pó de vidro não apresentam diferenças significativas no ganho de resistência mecânica, nem mesmo após 60 dias de cura úmida. Exceto para M2.3 com 10% de cal, situação em que os corpos de prova começam a responder aos aditivos. E ainda, há o ganho de resistência mecânica para as amostras M2.3, M2.4 e M2.6 pela adição de pó de vidro e pelo aumento dos dias de cura úmida.

Gráfico 6 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 60 dias de cura



Fonte: Autora (2020)

Portanto, o solo rosa não sofreu grandes mudanças em sua característica mecânica após adição de 3 e 7% de cal com 2% de pó de vidro. Mas, ao aumentar o teor de cal e o teor de pó de vidro para 5% o solo respondeu com a tendência de ganho de resistência mecânica como pode-se observar no Gráfico 6. Além disso, os corpos de prova rompidos após 60 dias de cura úmida apresentaram melhor desempenho, comprovando que houve reações de cimentação no decorrer do tempo devido a adição de pó de vidro e cal ao solo.

#### 4.4 Tração por Compressão Diametral

Os itens a seguir contém os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral dos dois solos das amostras curadas entre 7 e 90 dias. Os resultados foram desenvolvidos com o auxílio no Microsoft Excel, assim como os gráficos que foram plotados no mesmo software.



#### 4.4.1 Solo vermelho

Foram rompidos um total de 57 corpos de prova conforme a Figura 11, divididos em tempo de cura de 7 dias, 28 dias e 90 dias. Cada mistura corresponde a 3 corpos de prova.

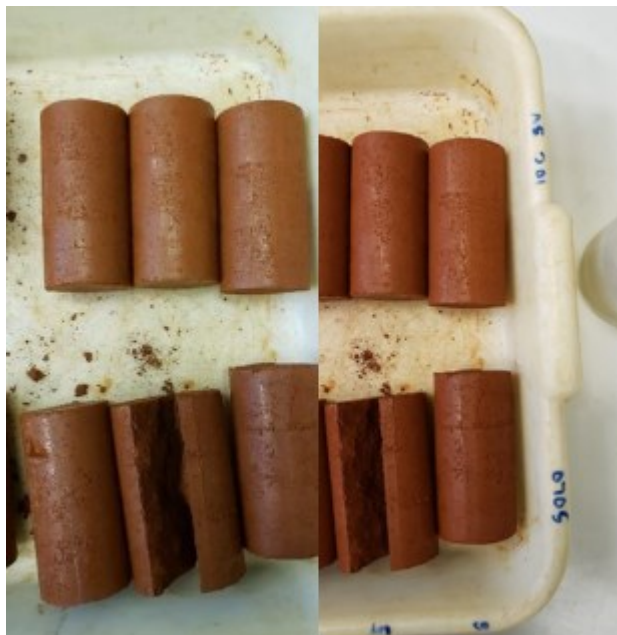
Figura 14 - Ensaio de tração por compressão diametral do solo



Fonte: Autora (2020)

Após os corpos de prova passarem o tempo determinado de cura, eles foram pesados e em seguida levados ao ensaio de tração por compressão diametral. O padrão de rompimento no ensaio de tração por compressão diametral ocorre conforme a Figura 14.

Figura 15 - Corpo de prova após o rompimento no ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autora (2020)

Pode-se observar na Tabela 21 os resultados do ensaio de tração por compressão diametral realizado após 7 dias de cura dos cp's.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de compressão simples do solo vermelho com 7 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 23,218<br>24,557<br>25,813    | 24,530             | 1,298                      | 1,714                   | 0,99                        | 24,530 $\pm$ 0,99   |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 19,293<br>28,270<br>28,327    | 25,297             | 5,199                      | 6,868                   | 3,97                        | 25,297 $\pm$ 3,97   |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 63,154<br>55,476<br>88,930    | 69,187             | 17,524                     | 23,149                  | 13,37                       | 69,187 $\pm$ 13,37  |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 119,142<br>134,250<br>132,353 | 128,582            | 8,230                      | 10,872                  | 6,28                        | 128,582 $\pm$ 6,28  |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 26,967<br>30,777<br>25,751    | 27,832             | 2,622                      | 3,464                   | 2,00                        | 27,832 $\pm$ 2,00   |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 103,264<br>98,002<br>108,155  | 103,140            | 5,078                      | 6,708                   | 3,87                        | 103,140 $\pm$ 3,87  |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 133,821<br>163,830<br>120,665 | 139,439            | 22,124                     | 29,226                  | 16,87                       | 139,439 $\pm$ 16,87 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 22

Tabela 22 - Análise de variância do sol vermelho para 7 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 45253,7            | 6  | 7542,29          | 57,04                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 1851,33            | 14 | 132,238          |                             |         |
| Total             | 47105,1            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 23.

Tabela 23 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho e 7 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 24,5293 | A                  |
| M1-1       | 3          | 25,2967 | A                  |
| M1-4       | 3          | 27,8317 | A                  |
| M1-2       | 3          | 69,1867 | B                  |
| M1-5       | 3          | 103,14  | C                  |
| M1-3       | 3          | 128,582 | CD                 |
| M1-6       | 3          | 139,439 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M1.2, sendo um ganho de 282% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M1.6 apresenta um ganho de 568% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Já na Tabela 24 observa-se os resultados do ensaio de tração por compressão diametral das misturas após 28 dias de cura úmida.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo vermelho com 28 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa) | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|--------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 23,218       | 24,530             | 1,298                      | 1,714                   | 0,99                        | 24,530 $\pm$ 0,99   |
|                                       |           | 24,557       |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 25,813       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 24,292       | 28,128             | 8,950                      | 11,823                  | 6,83                        | 28,128 $\pm$ 6,83   |
|                                       |           | 21,735       |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 38,356       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 140,639      | 150,016            | 8,220                      | 10,859                  | 6,27                        | 150,016 $\pm$ 6,27  |
|                                       |           | 153,425      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 155,982      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 207,123      | 200,730            | 9,986                      | 13,191                  | 7,62                        | 200,730 $\pm$ 7,62  |
|                                       |           | 189,224      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 205,845      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 47,306       | 41,340             | 5,765                      | 7,616                   | 4,40                        | 41,340 $\pm$ 4,40   |
|                                       |           | 35,800       |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 40,913       |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 180,274      | 176,012            | 3,906                      | 5,160                   | 2,98                        | 176,012 $\pm$ 2,98  |
|                                       |           | 175,160      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 172,603      |                    |                            |                         |                             |                     |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 254,429      | 261,674            | 13,671                     | 18,059                  | 10,43                       | 261,674 $\pm$ 10,43 |
|                                       |           | 277,443      |                    |                            |                         |                             |                     |
|                                       |           | 253,151      |                    |                            |                         |                             |                     |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 25.

Tabela 25 - Análise da variância do solo vermelho para 28 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 162338,            | 6  | 27056,4          | 390,95                      | 0,0000  |
| Não Explicada     | 968,902            | 14 | 69,2073          |                             |         |
| Total             | 163307,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 26.

Tabela 26 - Análise da variância do solo vermelho para 28 dias

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 24,5293 | A                  |
| M1-1       | 3          | 28,1277 | A                  |
| M1-4       | 3          | 41,3397 | A                  |
| M1-2       | 3          | 150,015 | B                  |
| M1-5       | 3          | 176,012 | C                  |
| M1-3       | 3          | 200,731 | D                  |
| M1-6       | 3          | 261,674 | E                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M1.2, sendo um ganho de 610% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M1.6 apresenta um ganho de 1065% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

A Tabela 27 contém os resultados dos corpos de prova rompidos no ensaio de tração por compressão diametral após 90 dias de cura úmida.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo vermelho com 90 dias de cura

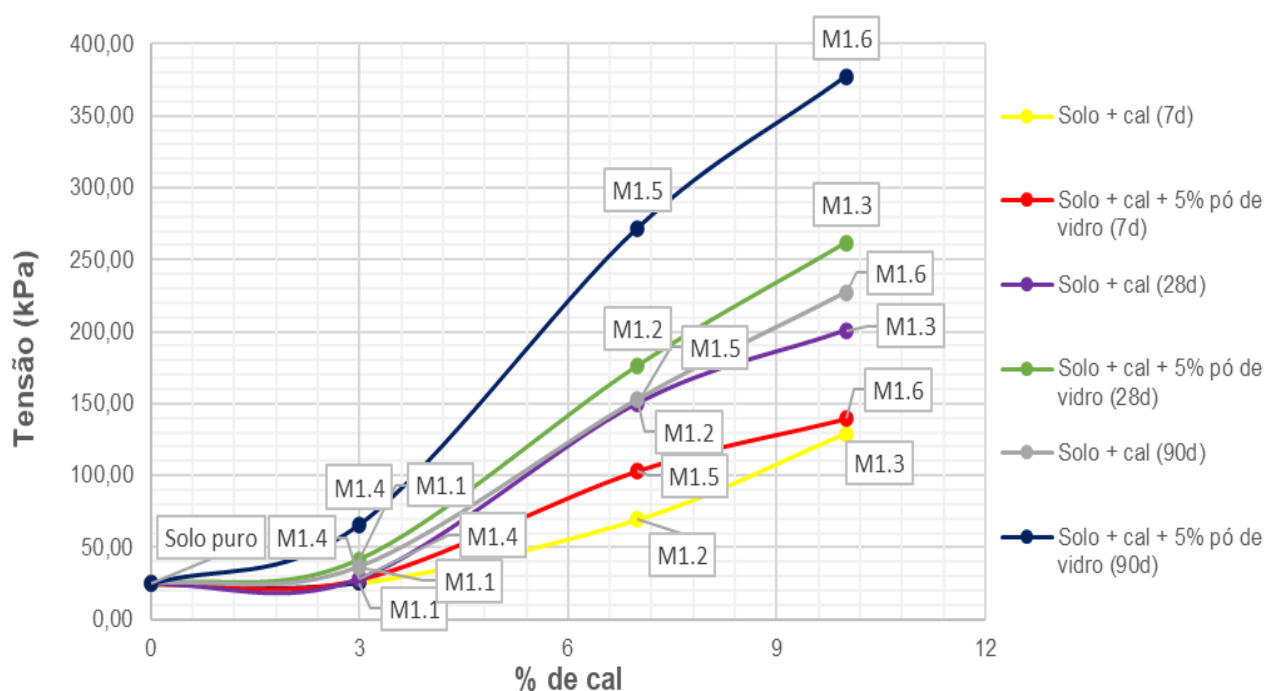
|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 23,218<br>24,557<br>25,813    | 24,530             | 1,298                      | 1,714                   | 0,99                        | 24,530 $\pm$ 0,99   |
| Solo + 3% de cal                      | M1.1      | 30,685<br>38,356<br>39,635    | 36,225             | 4,840                      | 6,394                   | 3,69                        | 36,225 $\pm$ 3,69   |
| Solo + 7% de cal                      | M1.2      | 212,238<br>97,169<br>148,311  | 152,572            | 57,653                     | 76,159                  | 43,97                       | 152,572 $\pm$ 43,97 |
| Solo + 10% de cal                     | M1.3      | 291,507<br>286,392<br>103,561 | 227,154            | 107,064                    | 141,432                 | 81,66                       | 227,154 $\pm$ 81,66 |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.4      | 63,927<br>58,812<br>74,155    | 65,631             | 7,812                      | 10,320                  | 5,96                        | 65,631 $\pm$ 5,96   |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M1.5      | 276,164<br>260,822<br>278,722 | 271,903            | 9,681                      | 12,789                  | 7,38                        | 271,903 $\pm$ 7,38  |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M1.6      | 352,877<br>310,686<br>469,224 | 377,596            | 82,109                     | 108,466                 | 62,62                       | 377,596 $\pm$ 62,62 |

Fonte: Autora (2021)

Finalizando as análises com os cp's de 90 dias de cura úmida, observa-se um comportamento semelhante aos demais: não há um ganho expressivo de resistência entre o solo puro e a adição de 3% de cal, o ganho de resistência entre o solo puro e o solo + 10% agora ultrapassa os 1000% e a adição de pó de vidro começa a resultar em um ganho de resistência mais expressivo do que observado anteriormente, sendo a média de 75% de ganho em relação as misturas de apenas solo e cal.

Observa-se no Gráfico 7, um ganho de resistência mecânica do solo conforme ocorre a adição de cal nas misturas M1.1, M1.2 e M1.3 em relação ao solo puro. Além disso a mistura M1.6 difere da M1.3 pela adição de 5% de cal, o que provocou um aumento na resistência ao ensaio de tração por compressão diametral.

Gráfico 7 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 90 dias de cura



Fonte: Autora (2020)

Portanto, o aumento de teor de cal e a adição de pó de vidro ao solo vermelho provoca uma tendência de aumento de resistência ao ensaio de tração por compressão diametral ao solo. Além disso, observa-se no Gráfico 7 o ganho de

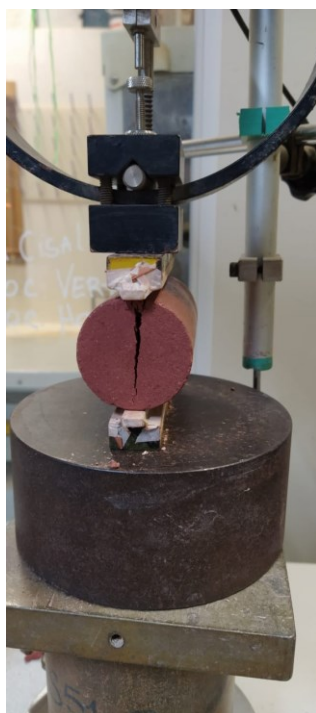


resistência mecânica de cada mistura com o aumento do tempo de cura, evidenciando o acontecimento das reações de cimentação.

#### 4.4.2 Solo rosa

Para o solo rosa foram rompidos um total de 57 corpos de prova conforme a Figura 11, divididos em tempo de cura de 7 dias, 28 dias e 60 dias. Cada mistura corresponde a 3 corpos de prova.

Figura 16 - Ensaio de tração por compressão simples do solo



Fonte: Autora (2020)

Após os corpos de prova passarem o tempo determinado de cura, eles foram pesados e em seguida levados ao ensaio.

Pode-se observar na Tabela 28 os resultados do ensaio de tração por compressão diametral após 7 dias de cura das misturas.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 7 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma_m$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 54,185<br>52,284<br>54,502    | 53,657             | 1,200                      | 1,585                   | 0,91                        | 53,657 $\pm$ 0,91   |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 58,304<br>68,761<br>69,078    | 65,381             | 6,131                      | 8,099                   | 4,68                        | 65,381 $\pm$ 4,68   |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 53,551<br>51,650<br>46,580    | 50,594             | 3,604                      | 4,760                   | 2,75                        | 50,594 $\pm$ 2,75   |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 137,522<br>125,341<br>129,600 | 130,821            | 6,181                      | 8,166                   | 4,71                        | 130,821 $\pm$ 4,71  |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 152,098<br>152,100<br>123,896 | 142,698            | 16,283                     | 21,510                  | 12,42                       | 142,698 $\pm$ 12,42 |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 96,646<br>85,872<br>96,012    | 92,843             | 6,046                      | 7,986                   | 4,61                        | 92,843 $\pm$ 4,61   |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 92,843<br>111,222<br>116,608  | 106,891            | 12,460                     | 16,460                  | 9,50                        | 106,891 $\pm$ 9,50  |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 29.

Tabela 29 - Análise de variância do sol rosa para 7 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 24578,6            | 6  | 4096,44          | 52,41                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 1094,35            | 14 | 78,1676          |                             |         |
| Total             | 25673,0            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 30.

Tabela 30 - Teste de Turkey-Kramer para o solo vermelho e 7 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| M2-2       | 3          | 50,5937 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 53,657  | A                  |
| M2-1       | 3          | 65,381  | A                  |
| M2-5       | 3          | 92,8433 | B                  |
| M2-6       | 3          | 106,891 | BC                 |
| M2-3       | 3          | 130,821 | CD                 |
| M2-4       | 3          | 142,698 | D                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M25, sendo um ganho de 183% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 281% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Já na Tabela 31 observa-se os resultados do ensaio de tração por compressão diametral das misturas após 28 dias de cura úmida.

Tabela 31 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 28 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 53,868<br>51,016<br>57,987    | 54,291             | 3,505                      | 4,630                   | 2,67                      | 54,291 $\pm$ 2,67   |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 37,708<br>44,679<br>43,728    | 42,038             | 3,780                      | 4,994                   | 2,88                      | 42,038 $\pm$ 2,88   |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 28,518<br>34,856<br>42,778    | 35,384             | 7,144                      | 9,438                   | 5,45                      | 35,384 $\pm$ 5,45   |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 75,732<br>83,135<br>86,823    | 81,896             | 5,648                      | 7,461                   | 4,31                      | 81,896 $\pm$ 4,31   |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 97,913<br>85,238<br>90,625    | 91,259             | 6,361                      | 8,403                   | 4,85                      | 91,259 $\pm$ 4,85   |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 105,835<br>95,061<br>105,518  | 102,138            | 6,131                      | 8,099                   | 4,68                      | 102,138 $\pm$ 4,68  |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 129,917<br>141,007<br>113,440 | 128,121            | 13,871                     | 18,324                  | 10,58                     | 128,121 $\pm$ 10,58 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 32.

Tabela 32 - Análise de variância do solo rosa para 28 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 20821,2            | 6  | 3470,2           | 63,93                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 759,955            | 14 | 54,2825          |                             |         |
| Total             | 21581,1            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 33.

Tabela 33 - Teste de Turkey-Kramer para o solo rosa e 28 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| M2-2       | 3          | 35,384  | A                  |
| M2-1       | 3          | 42,0383 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 54,2903 | A                  |
| M2-3       | 3          | 81,8967 | B                  |
| M2-4       | 3          | 91,2587 | B                  |
| M2-5       | 3          | 102,138 | B                  |
| M2-6       | 3          | 128,121 | C                  |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M2.3, sendo um ganho de 231% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 361% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

A Tabela 34 contém os resultados dos corpos de prova rompidos na compressão simples após 60 dias de cura úmida.

Tabela 34 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral do solo rosa com 60 dias de cura

|                                       | Mistura   | Tensão (kPa)                  | Tensão média (kPa) | Desvio Padrão ( $\sigma$ ) | Desvio Padrão Corrigido | Desvio médio ( $\sigma$ ) | Valor (kPa)         |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| Solo puro                             | Solo puro | 40,876<br>37,708<br>37,074    | 38,553             | 2,037                      | 2,691                   | 1,55                      | 38,553 $\pm$ 1,55   |
| Solo + 3% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.1      | 46,263<br>39,926<br>49,115    | 45,101             | 4,704                      | 6,213                   | 3,59                      | 45,101 $\pm$ 3,59   |
| Solo + 7% de cal + 2% de pó de vidro  | M2.2      | 39,926<br>40,243<br>46,897    | 42,355             | 3,936                      | 5,200                   | 3,00                      | 42,355 $\pm$ 3,00   |
| Solo + 10% de cal + 2% de pó de vidro | M2.3      | 166,991<br>198,883<br>202,163 | 189,346            | 19,429                     | 25,666                  | 14,82                     | 189,346 $\pm$ 14,82 |
| Solo + 3% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.4      | 250,961<br>177,131<br>144,810 | 190,967            | 54,412                     | 71,878                  | 41,50                     | 190,967 $\pm$ 41,50 |
| Solo + 7% de cal + 5% de pó de vidro  | M2.5      | 138,789<br>205,332<br>136,888 | 160,337            | 38,979                     | 51,491                  | 29,73                     | 160,337 $\pm$ 29,73 |
| Solo + 10% de cal + 5% de pó de vidro | M2.6      | 329,545<br>278,212<br>291,204 | 299,654            | 26,689                     | 35,257                  | 20,36                     | 299,654 $\pm$ 20,36 |

Fonte: Autora (2021)

A análise de variância foi realizada para os resultados de compressão simples do solo vermelho conforme a Tabela 35.

Tabela 35 - Análise de variância do solo rosa para 60 dias

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 179222,            | 6  | 29870,3          | 37,26                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 11223,0            | 14 | 801,646          |                             |         |
| Total             | 190445,            | 20 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 36.

Tabela 36 - Teste de Turkey-Kramer para o solo rosa e 28 dias de cura

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 2     | 3          | 38,5527 | A                  |
| M2-2       | 3          | 42,3553 | A                  |
| M2-1       | 3          | 45,1013 | A                  |
| M2-5       | 3          | 160,336 | B                  |
| M2-3       | 3          | 189,346 | B                  |
| M2-4       | 3          | 190,967 | B                  |
| M2-6       | 3          | 299,654 | C                  |

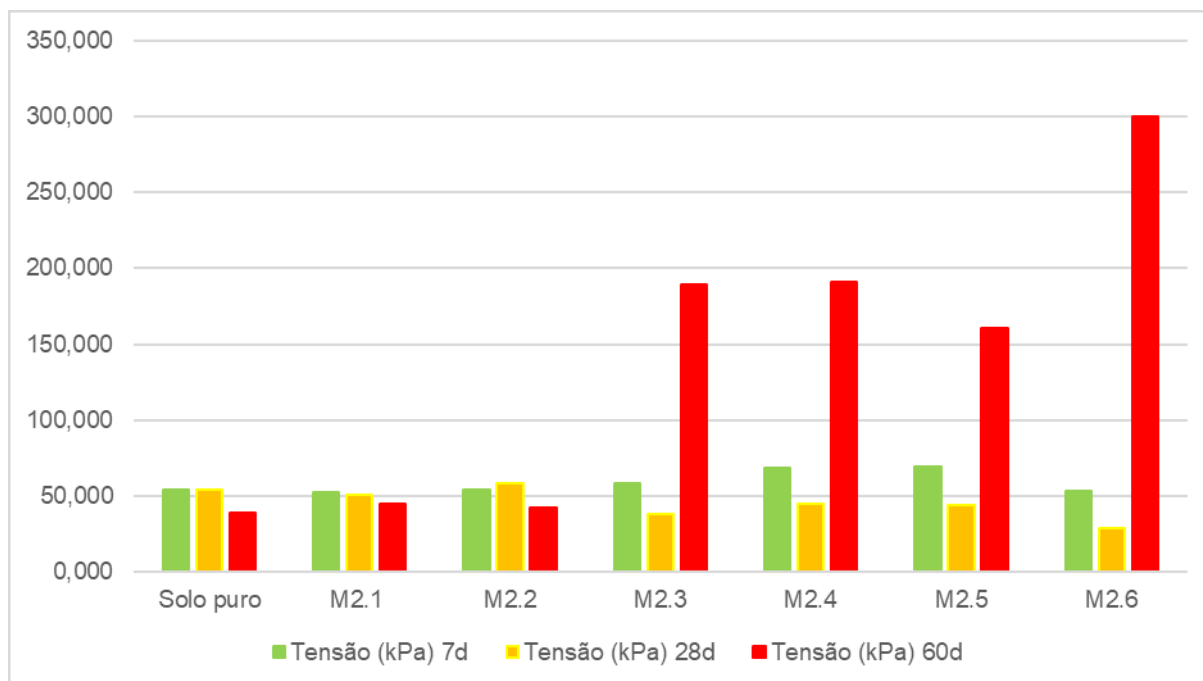
Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%. Observa-se diferença estatística entre o solo e a mistura M2.5, sendo um ganho de 415% a um nível de confiança de 95%. Além disso a M2.6 apresenta um ganho de 777% em relação ao solo puro a um nível de confiança de 95%.

Observa-se no Gráfico 8 que as misturas de solo puro, M2.1 e M2.2 não apresentam diferenças significativas no ganho de resistência mecânica, nem mesmo após 60 dias de cura úmida. Exceto para M2.3 com 10% de cal, caso em que os corpos de prova começam a apresentar o aumento da resistência mecânica. Além

disso, nota-se o ganho de resistência mecânica para as amostras M2.3, M2.4 e M2.6 pela adição de pó de vidro e, também, pelo aumento dos dias de cura úmida.

Gráfico 8 - Relação da % de cal e do ganho de resistência das misturas com 7, 28 e 60 dias de cura



Fonte: Autora (2021)

Portanto, o solo rosa não sofreu grandes mudanças em sua característica mecânica após adição de 3 e 7% de cal com 2% de pó de vidro. Mas, ao aumentar o teor de cal e o teor de pó de vidro para 5% o solo respondeu com a tendência de ganho de resistência mecânica como pode-se observar no Gráfico 8. Além disso, os corpos de prova rompidos após 60 dias de cura úmida apresentaram melhor desempenho, comprovando que houve reações de cimentação no decorrer do tempo devido a adição de pó de vidro e cal ao solo.

#### 4.5 Comparação entre o Solo Vermelho e o Solo Rosa

A seguir os dois solos utilizados neste trabalho serão comparados quanto suas características físicas e suas tendências de comportamento após adição de cal e pó de vidro. A Tabela 37 refere-se aos resultados deste trabalho em relação a cada solo.



Tabela 37 - Resultados da caracterização física dos solos

|                          | <b>Solo vermelho</b> | <b>Solo rosa</b> |
|--------------------------|----------------------|------------------|
| Classificação do solo    | Argilo siltoso       | Siltoso          |
| LL                       | 48%                  | 55%              |
| LP                       | 42%                  | 34%              |
| IP                       | 6%                   | 21%              |
| Gs (g/m <sup>3</sup> )   | 2,685                | 2,660            |
| Compressão simples (kPa) | 40,629               | 102,173          |
| Tração (kPa)             | 24,530               | 48,833           |

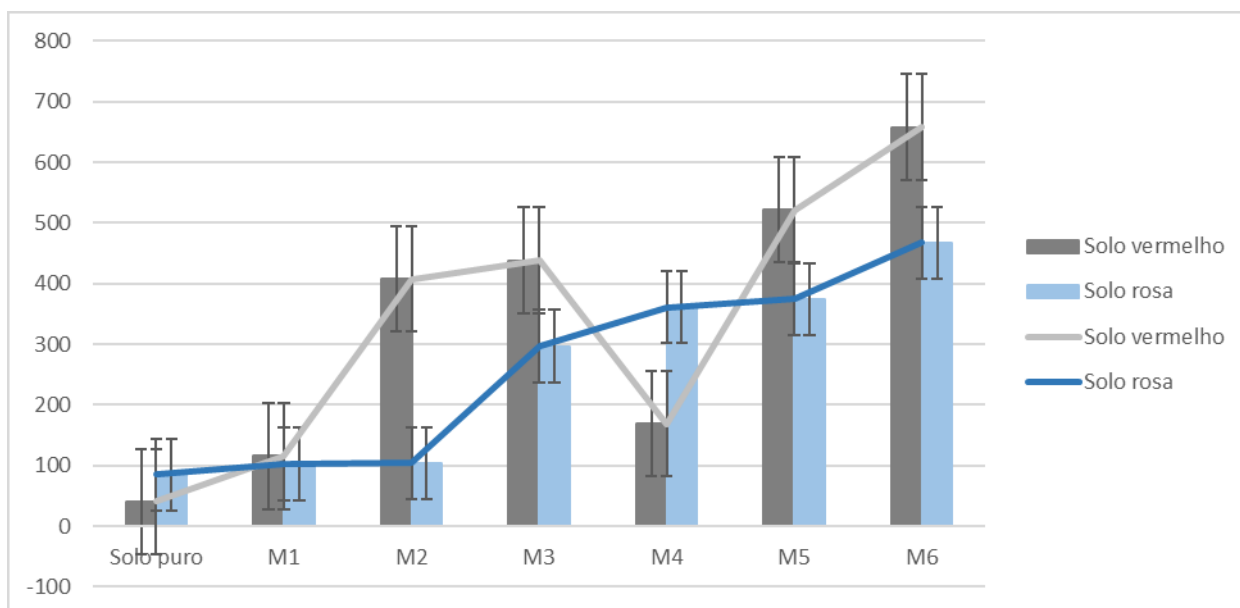
Fonte: Autora (2021)

A principal característica que difere os dois solos é quanto a plasticidade a análise granulométrica, que indicam o solo vermelho sendo mais argiloso do que o solo rosa. Ou seja, mais coeso. Além disso, observa-se os resultados dos ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral. O solo rosa apresenta-se mais resistente mecanicamente de forma geral, mas principalmente à compressão simples.

Como evidenciou-se nos resultados dos ensaios de resistência mecânica as reações de cimentação aos 90 dias para o solo vermelho e 60 dias para o solo rosa, usaremos estes resultados a seguir cura para a análise entre o comportamento dos dois solos diante dos aditivos.

Nos ensaios de compressão simples, os solos apresentaram um ganho de resistência mecânica com o aumento do teor de cal e pó de vidro. Porém, o solo vermelho mostrou-se mais vulnerável as pequenas adições de cal (3% e 7%) do que o solo rosa, que apresentou um resultado expressivo a partir das amostras M2.3 (10% de cal + 2% de pó de vidro), como pode-se observar no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Tendência do comportamento da resistência a compressão simples dos solos



Fonte: Autora (2021)

Observa-se que apesar de alguns comportamentos específicos de cada solo, os quais já foram abordados nos itens anteriores, ambos responderam positivamente a adição de cal e pó de vidro, tornando-se mais resistentes do que os solos puros.

A análise de variância realizada para a comparação dos dois solos, o solo vermelho aos 90 dias de tempo de cura e o solo rosa aos 60 dias de tempo de cura pode-se ser observado na Tabela 38.

Tabela 38 - Análise de variância entre o solo vermelho o solo rosa

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 209006,            | 13 | 16077,4          | 260,38                      | 0,0000  |
| Não Explicada     | 1728,86            | 28 | 61,7449          |                             |         |
| Total             | 210735,            | 41 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 39.

Tabela 39 - Teste de Turkey-Kramer para comparação do dois solos

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 40,6283 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 85,4493 | AB                 |
| M2-1       | 3          | 102,666 | AB                 |
| M2-2       | 3          | 104,25  | AB                 |
| M1-1       | 3          | 115,699 | AB                 |
| M1-4       | 3          | 169,079 | B                  |
| M2-3       | 3          | 297,013 | C                  |
| M2-4       | 3          | 361,022 | CD                 |
| M2-5       | 3          | 374,541 | CDE                |
| M1-2       | 3          | 407,768 | DE                 |
| M1-3       | 3          | 438,539 | DEF                |
| M2-6       | 3          | 467,807 | EF                 |
| M1-5       | 3          | 521,93  | F                  |
| M1-6       | 3          | 658,017 | G                  |

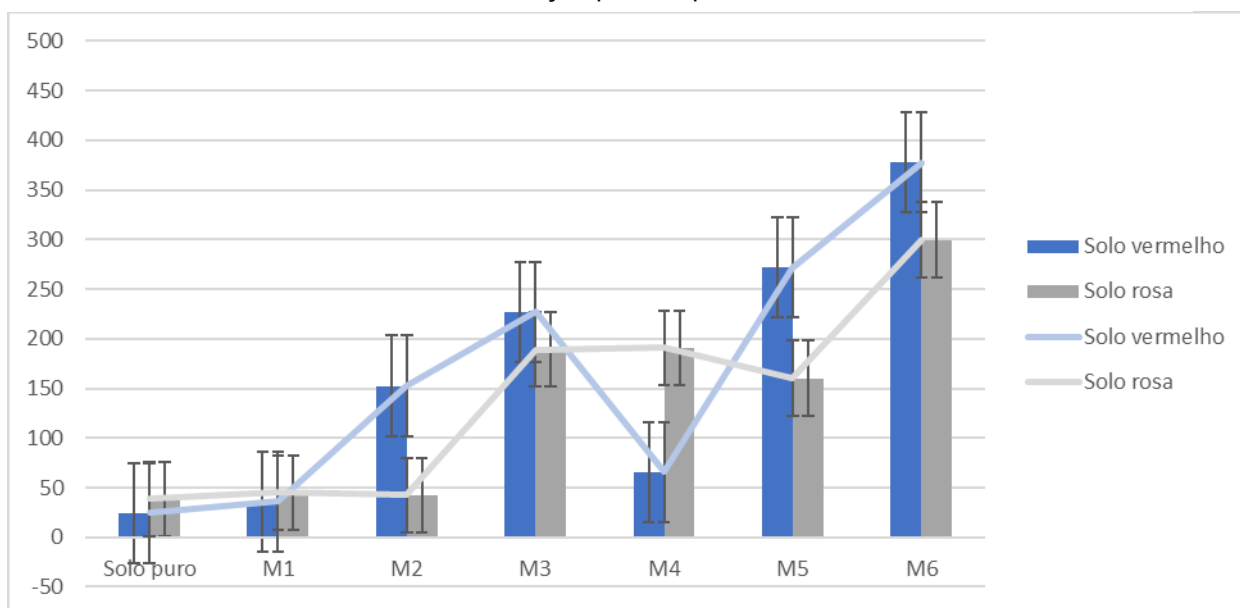
Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%.

O solo 2 é mais resistente à compressão simples que o solo 1, 44,821 kPa a um nível de confiança de 95%. As misturas com solo vermelho, cal e pó de vidro (M1.4, M1.5 e M1.6) apresentaram diferença estatística a um nível de significância de 95% em relação ao solo puro e as misturas de solo vermelho e cal (M1.1, M1.2 e M1.3). Ao contrário do solo rosa que não apresentou diferença estatística entre as misturas de solo e M2.1 e M2.2. O solo vermelho, apresentou diferença estatística entre as misturas M1.4, M1.5 e M1.6 a um nível de confiança de 95% com classes alfabéticas superiores as diferenças do solo rosa. E ainda, a mistura final dos dois solos possuem uma diferença estatística de 190,21 kPa entre si, sendo a M1.6 superior a M2.6.

Nos ensaios de tração por compressão diametral, os solos apresentaram um ganho de resistência mecânica com o aumento do teor de cal e pó de vidro. Porém, o solo vermelho mostrou-se mais vulnerável as pequenas adições de cal (3% e 7%) do que o solo rosa, que apresentou um resultado expressivo a partir das amostras M2.3 (10% de cal + 2% de pó de vidro), como pode-se observar no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral dos dois solos



Fonte: Autora (2021)

A análise de variância realizada para a comparação dos dois solos, o solo vermelho aos 90 dias de tempo de cura e o solo rosa aos 60 dias de tempo de cura pode-se ser observado na Tabela 40.

Tabela 40 - Análise de variância entre o solo vermelho o solo rosa

| Fonte da Variação | Soma dos Quadrados | GL | Quadrados Médios | Função F (Fischer-Snedecor) | P-Valor |
|-------------------|--------------------|----|------------------|-----------------------------|---------|
| Explicada         | 531479,            | 13 | 40883,0          | 37,46                       | 0,0000  |
| Não Explicada     | 30555,6            | 28 | 1091,27          |                             |         |
| Total             | 562035,            | 41 |                  |                             |         |

Fonte: Autora (2021)

Sendo o P o valor da função F que resultou em um valor menor que 0,05 (5%), o que significa que existem diferenças estatísticas significativas entre as misturas analisadas a um nível de confiança mínimo de 95%.

Para a comparação das médias foi realizado o teste de Tukey-Kramer para um nível de 95% de confiança conforme a Tabela 41.

Tabela 41 - Teste de Turkey-Kramer para comparação do dois solos

| Tratamento | Repetições | Médias  | Grupos Homogêneos* |
|------------|------------|---------|--------------------|
| Solo 1     | 3          | 24,5293 | A                  |
| M1-1       | 3          | 36,2253 | A                  |
| Solo 2     | 3          | 38,5527 | A                  |

|      |   |         |     |
|------|---|---------|-----|
| M2-2 | 3 | 42,3553 | A   |
| M2-1 | 3 | 45,1013 | A   |
| M1-4 | 3 | 65,6313 | AB  |
| M1-2 | 3 | 116,347 | ABC |
| M2-5 | 3 | 160,336 | BC  |
| M2-3 | 3 | 189,346 | CD  |
| M2-4 | 3 | 190,967 | CD  |
| M1-3 | 3 | 263,379 | DE  |
| M1-5 | 3 | 271,903 | DE  |
| M2-6 | 3 | 299,654 | EF  |
| M1-6 | 3 | 377,596 | F   |

Fonte: Autora (2021)

Conforme o método de Tukey-Kramer, os dados pertencentes a grupos alfabéticos diferentes possuem diferenças estatísticas a um nível de confiança de 95%.

O solo 2 é mais resistente à tração por compressão diametral que o solo 1, 29,76 kPa a um nível de confiança de 95%. As misturas com solo vermelho, cal e pó de vidro (M1.4, M1.5 e M1.6) apresentaram diferença estatística a um nível de significância de 95% em relação ao solo puro e as misturas de solo vermelho e cal (M1.1, M1.2 e M1.3). Já o solo rosa que não apresentou diferença estatística entre as misturas e M2.3, M2.4 e M2.5. O solo vermelho, apresentou diferença estatística entre as misturas M1.4, M1.5 e M1.6 a um nível de confiança de 95% com classes alfabéticas superiores as diferenças do solo rosa. E ainda, a mistura final dos dois solos possuem uma diferença estatística de 130,55 kPa entre si, sendo a M1.6 superior a M2.6.

## 5 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, conclui-se que tanto o solo vermelho quanto o solo rosa apresentaram ganho de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral conforme o aumento dos teores de cal e com a adição do pó de vidro. Além disso, as duas amostras responderam positivamente aos tempos de cura empregados de forma que, ao prolongar a permanência dos corpos de prova na câmara úmida a resistência mecânica nos ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral aumentou progressivamente.

O solo vermelho e o solo rosa utilizados neste trabalho são provenientes da formação Guabirotuba, de diferentes camadas, como mencionado anteriormente. Portanto a caracterização do solo realizada foi de extrema importância para diferenciarmos os solos. O solo vermelho apresentou-se mais argiloso do que o solo rosa na análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios reafirmar esta condição dos solos. Além disso, a umidade ótima de compactação do solo rosa foi maior do que a do solo vermelho. A resistência mecânica encontrada no ensaio de compressão simples e de tração à compressão diametral do solo rosa se sobressaiu ao solo vermelho, portanto o solo rosa é mais resistente mecanicamente do que o solo vermelho.

Os dois solos responderam positivamente de forma geral à adição de cal e pó de vidro, porém cada solo apresentou tendências diferentes. Nos ensaios, o ganho de resistência percentual do solo vermelho foi maior do que o percentual ganho pelo solo rosa quando acrescido de cal, no caso do solo vermelho e cal e 2% de pó de vidro no caso do solo rosa. Já o solo rosa, apresentou um ganho percentual maior de resistência mecânica quando alterado apenas a porcentagem de pó de vidro de 0% e 2% para 5%.

Por fim, os dois solos, apesar de serem provenientes da mesma formação, possuem algumas características físicas distintas que influenciam no comportamento mecânico, mas ambos responderam mecanicamente à adição de cal e pó de vidro para o melhoramento de solos.

## REFERÊNCIAS

ABIVIDRO. **Guia Reciclagem do Vidro**. Disponível em: <<https://abividro.org.br/wpcontent/uploads/2019/01/Abividro-Guia-Reciclagem-do-Vidro.pdf>>. Acesso em: 16 de Maio de 2021.

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, 2019.

AL-NEAMI, M. A. et al. **Remediation of cohesive soils using waste glass**. *Journal of Arts e Sciences, Conference of the International Journal of Arts e Sciences*, p. 125–137, 2016. Disponível em: <<http://universitypublications.net/proceedings/0901/pdf/DE5C87.pdf>>. Acesso em: Acessado: 27 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **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 7222**. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**, Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253**: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

BALDOVINO, J. A. **Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação Geológica Guabirotuba tratado com cal em diferentes tempos de cura**. Dissertação de mestrado, UTFPR, 2018.

BENNY, J. R.; J., J.; M., S. J.; T., 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>

BRITO, J. **Técnica de melhoramento de solos**. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2002.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017.

CASTRO, C.E.N.; SILVA, R.R.F.; SANTOS, L.F., et al. **Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas**. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019

CRUZ, M. L.; JALALI, S.. **Melhoramento do Desempenho de Misturas de Solo-Cimento com Recurso a Activadores de Baixo Custo**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, Lisboa, Portugal, v. 120, n. 3, p. 49-64, nov. 2010. Disponível em: <https://www.abms.com.br/links/revistageotecnia/Revista120.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNIT. DNER 093: **Solos – Determinação da densidade real: método de ensaio**. Brasília, 1994.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES- DNIT 143/2010 -: **Pavimentação – Base de solo-cimento** - Especificação de serviço. Brasília, 2010.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. Mineropar, Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://www.documentador.pr.gov.br/documentador/pub.do?action=d&uid=@gtf-escriba-minerop@5b42cca2-9f9b-4f7e-80bf-3414773d7913#:~:text=Os%20sedimentos%20da%20Forma%C3%A7%C3%A3o%20Guabirotuba%20atin%2D%20gem%20espessuras%20na%20ordem,e%20arc%C3%B3sios%20de%20granulometria%20grosseira.>> Acesso em: 21 abr. 2021

GHASABKOLAEI, N., CHOORBASTI, A. J., ROSHAN, N., et al., **Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review**, Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 17, n. 3, Mai. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.01.010>>. Acesso em: 20 abr. 2021

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2008.

IKARA, I. A., KUNDIRI, A. M., MOHAMMED, A. **Effects of waste glass (wg) on the strength characteristics of cement stabilized expansive soil**. American Journal of Engineering Research, v. 4, n 11, pag. 33 – 41, 2015.

ITAMBÉ. **Água, Cimento Portland e Concreto: por que não se vive sem eles?**. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/agua-cimento-portland-e-concreto-por-que-nao-se-vive-sem-eles/#:~:text=O%20concreto%20%C3%A9%20o%20segundo,est%C3%A1%20entre%20os%20mais%20consumidos>>. Acesso em: 16 de mai. 2021.

JUNIOR, J. S. **O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2005

KORMANN, A. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-20072009-092526/pt-br.php>>. Acesso em: 13 de abr. 2021

MAKUSA. G. P. **Soil stabilization methods and materials**. State of the art review. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

MARQUES. G. O. **Notas de aula da disciplina pavimentação**. 1 ed. Universidade Federal De Juiz De Fora, 2006. Disponível em: < <https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>> Acesso em: 05 mar. 2021.

MASSAZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: HEWLETT, P. C (Org.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, 2004. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/285467782\\_Aspects\\_of\\_the\\_pozzolanic\\_activity\\_and\\_properties\\_of\\_pozzolanic\\_cements](https://www.researchgate.net/publication/285467782_Aspects_of_the_pozzolanic_activity_and_properties_of_pozzolanic_cements)> Acesso em: 23 abr. 2021

PAULA, T. M. **Melhoramento de solos: Adição de cimento, microssílica e cinza de casca de arroz em um silte orgânico**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

PEREIRA. M. D. (**Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba**) Comunicação pessoal, 2020

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 Aulas**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 pg.

POLI-USP. **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2**. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html#:~:text=Com%20demanda%20anual%20da%20ordem,crescimento%20dos%20pa%C3%ADses%20em%20desenvolvimento.>>. Acesso em: 16 de Maio de 2021.

PUDELL. P.C.A. **(Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba)** Comunicação pessoal, 2021

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R., EBERT, H. D.. **Contribuição à geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. Boletim Paranaense de Geociências, n. 47, p. 123-142, 1999.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN SCHEUERMANN, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. **Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization**. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 30(6), p. 1 – 7, 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/324413427\\_Physical-Mineralogical-Chemical\\_Characterization\\_of\\_Carbide\\_Lime\\_An\\_Environment-Friendly\\_Chemical\\_Additive\\_for\\_Soil\\_Stabilization](https://www.researchgate.net/publication/324413427_Physical-Mineralogical-Chemical_Characterization_of_Carbide_Lime_An_Environment-Friendly_Chemical_Additive_for_Soil_Stabilization)> Acesso em: 05 mar. 2021

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2006

SANTOS. M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. Relatório de Iniciação Científica, PUC-RIO, 2012.

SCHEUERMANN. H. S. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto**. Dissertação de pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019

SILVA. M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação de mestrado, 2016.