

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DANIEL LEAL BRANDÃO**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO SILTOSO DE CURITIBA-PARANÁ**  
**MELHORADO COM CIMENTO E PÓ DE VIDRO**

**CURITIBA**  
**2023**

**DANIEL LEAL BRANDÃO**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO SILTOSO DE CURITIBA-PARANÁ  
MELHORADO COM CIMENTO E PÓ DE VIDRO  
Mechanical Behavior of a Silty Soil from Curitiba-Paraná improved with cement  
and glass powder**

Trabalho de pesquisa de Mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis Dos Santos Izzo.  
Co-orientador: Prof. Dr. Adauto Jose Miranda De Lima.

**CURITIBA**

**2023**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Ponta Grossa



---

DANIEL LEAL BRANDÃO

## **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO SILTOSO DE CURITIBA-PARANÁ MELHORADO COM CIMENTO E PÓ DE VIDRO**

Trabalho de pesquisa de Mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis Dos Santos Izzo.  
Co-orientador: Prof. Dr. Adauto Jose Miranda De Lima.

Data de aprovação: 15 de agosto de 2023

Prof. Dr. Ronaldo Luis Dos Santos Izzo - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Adauto Jose Miranda De Lima - UTFPR

Prof. Dr. Joe Arnaldo Villena Del Carpio - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR)

Prof. Dr. Matheus David Inocente Domingos - UTFPR

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 15/08/2023.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todos que contribuíram para o meu caminho acadêmico. Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e oportunidades. Minha gratidão vai também à minha família e amigos, que sempre me estimularam e apoiaram meu amor pela educação. Um agradecimento especial aos familiares que sempre estiveram ao meu lado, em especial minha mãe Deilda, minha irmã Amanda e seu marido Danilo, Harlen, Nelita e Derzina, bem como aos amigos pessoais Evandro, Marcel e Victória, que me acompanharam nessa jornada acadêmica.

Também sou muito grato aos colegas do Lab-Geo, que estiveram presentes na rotina do laboratório e no desenvolvimento da dissertação, compartilhando momentos bons e difíceis. Especial agradecimento a Jéssica Leindorf, Yeimy Ordonez e Paula Pudell. (Vocês foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo).

Quero expressar minha gratidão ao Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo, por me proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho e me integrar ao programa, bem como por sua experiência e apoio ao tema escolhido. Ao professor Dr. Aduino José Miranda de Lima, agradeço pela ajuda no tema e valiosa contribuição em pesquisas de campo. Também agradeço ao professor Dr. Matheus David Inocente Domingos pela sua contribuição e apoio. Ao professor Dr. Joe Arnaldo Villena Del Carpio por complementar a banca com sua expertise em pavimentação.

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho pelos conselhos e recomendações enquanto fui representante discente do PPGEC, e à Prof. Dra. Janine Nicolosi Corrêa por suas valiosas contribuições para este trabalho.

Sou grato aos laboratoristas Felipe Perretto e Alexandre Gonçalves pela dedicação e apoio nos ensaios realizados nos câmpus ecoville e centro, respectivamente.

Finalmente, expresso meu agradecimento a todos os membros da banca. Agradeço também à UTFPR pelo suporte na pesquisa, assim como ao CNPq, Capes e outros órgãos de fomento em pesquisas científicas. Minha gratidão a todos que contribuíram para minhas conquistas acadêmicas em todas as fases.

*São precisamente as perguntas para as quais não existem respostas que marcam os limites das possibilidades humanas e traçam as fronteiras da nossa existência.*

(KUNDERA; MILAN, 1983)

## RESUMO

Os solos da Formação Guabirota, predominantes em Curitiba, apresentam alta expansibilidade e baixa resistência mecânica, que resultam em condições geotécnicas desfavoráveis para a implantação de obras de engenharia. Neste contexto, o presente trabalho investigou a influência da adição de cimento e pó de vidro na resistência de um solo siltoso local. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas em uma rua que apresentava defeitos na pavimentação, revelando o comportamento colapsível do solo. As amostras foram, inicialmente, submetidas a ensaios de caracterização para determinação da composição mineralógica da fração fina e grossa, da textura, da estrutura, dos índices físicos, dos limites de consistência e dos ensaios de resistência mecânica: resistência à tração por compressão diametral e compressão simples. Foram ensaiadas misturas de diferentes teores de pó de vidro (0%, 1%, 2%, 3% e 4%) em combinação com teores de cimento (0%, 2%, 4%, 6% e 8%). Os resultados dos ensaios de compactação das misturas mostraram comportamentos semelhantes entre as diferentes energias aplicadas, com redução do peso específico aparente seco e aumento da umidade ótima em relação ao solo natural, além de maior resistência mecânica. A pesquisa compreendeu duas fases, em ambas foram conduzidos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral. A primeira fase, mais simplificada, abrangeu três misturas com um período de cura de 28 dias e dosagem na umidade ideal. Os ensaios, realizados em quadruplicata, visaram obter os parâmetros iniciais de resistência. Já na segunda fase, foram testadas nove misturas com umidade fixa, apresentando tempos de cura de 28 e 90 dias, e amostras em quintuplicata. Foi realizada uma análise estatística aprofundada para avaliar o impacto dos aditivos na resistência das amostras. Posteriormente, foram desenvolvidos modelos de regressão para relacionar a resistência mecânica com as variáveis de cimento e pó de vidro. Os resultados indicaram uma correlação extremamente forte para os ensaios com 28 dias de cura, e moderada para as amostras com 90 dias de cura. Os coeficientes associados ao cimento e ao pó de vidro nas equações regressivas demonstraram que ambos os aditivos contribuem positivamente para a resistência à tração e compressão, embora essa influência tenda a diminuir com o tempo, sendo mais sensível no período inicial de 28 dias. Mesmo após 90 dias, o modelo de regressão ainda indicou um aumento na resistência de todas as amostras.

Palavras-chave: Melhoramento de solo; cimento; pó de vidro; reação pozolânica.

## ABSTRACT

The soils of the Guabirotuba Formation, predominant in Curitiba, exhibit high expansibility and low mechanical resistance, resulting in unfavorable geotechnical conditions for the implementation of engineering works. In this context, the present study investigated the influence of adding cement and glass powder on the strength of a local silty soil. For this purpose, undisturbed samples were collected from a street exhibiting pavement defects, revealing the collapsible behavior of the soil. The samples underwent initial characterization tests to determine the mineralogical composition of the fine and coarse fractions, texture, structure, physical indices, consistency limits, and mechanical resistance tests: tensile strength by diametral compression and simple compression. Mixtures with varying proportions of glass powder (0%, 1%, 2%, 3%, and 4%) in combination with cement proportions (0%, 2%, 4%, 6%, and 8%) were tested. The results of the mixture compaction tests showed similar behaviors under different applied energies, with a decrease in apparent dry bulk density and an increase in optimum moisture content compared to the natural soil, along with increased mechanical resistance. The research comprised two phases, both involving tests of simple compression and tensile strength by diametral compression. The first, more simplified phase encompassed three mixtures with a curing period of 28 days and optimal moisture content. Tests were conducted in quadruplicate to obtain the initial resistance parameters. In the second phase, nine mixtures with fixed moisture content were tested, with curing times of 28 and 90 days, and samples in quintuplicate. A comprehensive statistical analysis was conducted to assess the impact of additives on sample resistance. Subsequently, regression models were developed to relate mechanical strength to the variables of cement and glass powder. The results indicated an extremely strong correlation for tests with a 28-day curing period and a moderate correlation for samples with a 90-day curing period. The coefficients associated with cement and glass powder in the regression equations revealed that both additives positively contribute to tensile and compressive strength, although this influence tends to diminish over time, being more pronounced in the initial 28-day period. Even after 90 days, the regression model still indicated an increase in the strength of all samples.

Keywords: Soil improvement; cement; glass powder; pozzolanic reaction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região da formação Guabirota	21
Figura 2 - Materiais utilizados no estudo – Solo, cimento e pó de vidro	38
Figura 3 - Representação das misturas – M1 ao M8	39
Figura 4 - Localização e área de coleta	40
Figura 5 - Preparação do pó de Vidro (a) Resíduo de vidro; (b) Resíduo após a cominuição de 8 horas na abrasão Los Angeles.	41
Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral	46
Figura 7 - Curva granulométrica do solo, cimento e PV	51
Figura 8 - limites de Atterberg	54
Figura 9 - Classificação SUCS das amostras	55
Figura 10 - Curvas de compactação	57
Figura 11 - Resultados de compressão simples para 28 dias	60
Figura 12 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 dias	61
Figura 13 - Incrementos na resistência da compressão simples com a adição de PV - 28 dias	68
Figura 14 - Representação tridimensional da resistência da compressão simples com a adição de PV - 28 dias	68
Figura 15 - Incrementos na resistência da compressão simples com a adição de PV - 90 dias	69
Figura 16 - Representação tridimensional da resistência da compressão simples com a adição de PV - 90 dias	70
Figura 17 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 e 90 dias	71
Figura 18 - Incrementos na resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 28 dias	76
Figura 19 - Representação tridimensional da resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 28 dias	77
Figura 20 - Incrementos na resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 90 dias	77
Figura 21 - Representação tridimensional da resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 90 dias	78
Figura 22 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do solo com diferentes ampliações: a) 100x, b) 500x, c) 1000x e d) 5000x.	79
Figura 23 : Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do cimento com diferentes ampliações: a) 100x, b) 500x, c) 1000x e d) 5000x.	80
Figura 24 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó de vidro com diferentes ampliações: a) 1000x, b) 5000x;	81
Figura 25 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da mistura M8	83



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fluxograma do método de pesquisa .....	34
Quadro 2 - Fluxograma das variáveis de pesquisa .....	35
Quadro 3 - Ensaio realizados .....	38
Quadro 4 - Teor de cimento e pó de vidro das amostras.....	39
Quadro 5 - Planejamento de amostras ensaiadas .....	45
Quadro 6 - Valores de R (Pierce).....	48
Quadro 7 - Análise de Variância.....	49
Quadro 8 - Granulometria das amostras .....	52
Quadro 9 - Composição química das amostras .....	53
Quadro 10 - limites de Atterberg e classificação do solo .....	54
Quadro 11 - Umidade ótima (U) e Peso específico seco máximo ( $\gamma_d, \max$ ).....	58
Quadro 12 - Comparativo de parâmetros com pesquisas semelhantes .....	59
Quadro 13 - Resultados de compressão simples para 28 dias .....	59
Quadro 14 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 dias ....	61
Quadro 15 - Resultados de compressão simples para 28 e 90 dias .....	62
Quadro 16 - Resultados de compressão simples para 28 e 90 dias .....	63
Quadro 17 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 e 90 dias .....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos .....	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Delimitação da Pesquisa</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Melhoramento de Solos</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Formação Guabirota</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Estabilizantes tradicionais</b> .....	<b>25</b>
2.3.1	Cimento .....	25
2.3.2	Pó de vidro (pozolanas).....	28
<b>2.4</b>	<b>Parâmetros de resistência do solo</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Programa experimental</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>38</b>
3.2.1	Solo .....	40
3.2.2	Cimento .....	40
3.2.3	Vidro .....	41
<b>3.3</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>41</b>
3.3.1	Preparação das amostras.....	41
3.3.2	Ensaio de Caracterização do Solo, Cimento, Vidro e mistura .....	42
3.3.3	Ensaio de Granulometria .....	42
3.3.4	Ensaio de massa específica real dos grãos .....	43
3.3.5	Espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	43
3.3.6	Limites de Atterberg.....	44
3.3.7	Ensaio de compactação .....	44
3.3.8	Ensaio de Resistência Mecânica .....	44
3.3.9	Ensaio de resistência à compressão simples .....	45
<b>3.4</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>46</b>
3.4.1	Determinação da Amostra Mínima .....	46
3.4.2	Análise de Dados Espúrios (Outliers).....	47

3.4.3	Teste de Hipóteses.....	49
3.4.4	Análise de Variância – Anova.....	49
3.4.5	Valor-p .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do solo, cimento, pó de vidro e misturas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de compactação .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de resistência mecânica – Etapa 1 .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de compressão simples – Etapa 2.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise estatística dos ensaios de compressão simples – Etapa 2.....</b>	<b>63</b>
4.5.1	Correlação do Modelo para compressão simples aos 28 dias de cura .....	64
4.5.2	Análise da Variância do Modelo para compressão simples aos 28 dias de cura .....	64
4.5.3	Correlações Parciais em Relação à Variável Dependente para compressão simples aos 28 dias de cura .....	64
4.5.4	Teste de Kolmogorov-Smirnov para compressão simples aos 28 dias de cura .....	65
4.5.5	Teste de Sinais para compressão simples aos 28 dias de cura .....	65
4.5.6	Autocorrelação para compressão simples aos 28 dias de cura.....	65
4.5.7	Correlação do Modelo para compressão simples aos 90 dias de cura .....	65
4.5.8	Análise da Variância do Modelo para compressão simples aos 90 dias de cura .....	66
4.5.9	Correlações Parciais em Relação à Variável Dependente para compressão simples aos 90 dias de cura .....	66
4.5.10	Teste de Sinais para compressão simples aos 90 dias de cura .....	66
4.5.11	Autocorrelação para compressão simples aos 90 dias de cura.....	67
4.5.12	Modelo tridimensional e incrementos na resistência para compressão simples .....	67
<b>4.6</b>	<b>Ensaio de tração por compressão diametral – Etapa 2.....</b>	<b>70</b>
<b>4.7</b>	<b>Análise estatística dos ensaios de tração por compressão diametral – Etapa 2 .....</b>	<b>72</b>
4.7.1	Correlação do Modelo para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura .....	72
4.7.2	Análise da Variância do Modelo para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura.....	72
4.7.3	Correlações Parciais para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura .....	73
4.7.4	Teste de Kolmogorov-Smirnov para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura.....	73

4.7.5	Teste de Sinais para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura .....	73
4.7.6	Autocorrelação para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura .....	74
4.7.7	Correlação do Modelo para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura .....	74
4.7.8	Análise da Variância do Modelo para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura .....	74
4.7.9	Correlações Parciais para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura .....	75
4.7.10	Teste de Sinais para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura .....	75
4.7.11	Autocorrelação para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura .....	75
4.7.12	Modelo tridimensional e incrementos na resistência para tração por compressão diametral .....	76
<b>4.8</b>	<b>Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras</b>	<b>78</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b>	.....	<b>84</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	.....	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O solo desempenha um papel crucial no contexto de obras de infraestrutura, servindo como alicerce e base estrutural para obras de infraestrutura. Assim, a adequação das propriedades físico-químicas do solo é primordial para assegurar sua capacidade de suportar e dissipar as cargas impostas sobre estruturas. A proximidade dos locais de extração ao local de obra facilita o manejo e transporte, mas o solo nem sempre pode apresentar as resistências desejadas, tornando-se inapropriado para determinadas aplicações, como pavimentação de estradas e construção de ferrovias (MEDINA, 1987).

Nesse cenário, o melhoramento de solos emerge como uma alternativa viável, proporcionando a otimização de suas propriedades para atender às demandas construtivas (ORDONEZ, 2021). As ações de estabilização do solo visam melhorar propriedades específicas, como resistência mecânica e durabilidade. No entanto, o processo pode influenciar outras características, como teor de umidade e permeabilidade (PUDELL, 2022).

Curitiba, cenário do presente estudo, é reconhecida nacional e internacionalmente como uma cidade-modelo em urbanismo. Esse status exige uma infraestrutura sólida e eficiente. A malha viária urbana da cidade, especialmente os pavimentos flexíveis, desempenha um papel crucial tanto funcional quanto estético. Porém, observam-se falhas e problemas nos pavimentos ao longo do tempo, refletindo lacunas na gestão e manutenção da infraestrutura e a necessidade de ampliar técnicas e materiais (GARCIA, 2020).

Diante disso, em busca de soluções mais acessíveis, optou-se, em certas ocasiões, por técnicas como o tratamento anti-pó (TAP). Contudo, apesar de econômicas, estas soluções provaram ter menor longevidade (TRISOTTO, 2013), levando à adoção de ampliação de técnicas de pavimentação, como os métodos de reciclagem e estabilização in loco (ROCHA, 2017).

Os solos da Formação Guabirota, predominantes em Curitiba, apresentam desafios geotécnicos para pavimentação, como granulometria fina e baixa resistência mecânica (KORMANN, 2002; BALDOVINO et al., 2021). Pesquisas recentes exploraram o melhoramento desses solos, principalmente com adição de cimento e resíduos da construção civil (BALDOVINO et al., 2019; MOREIRA et al., 2019). Neste contexto, resíduos de vidro, frequentemente encontrados nas obras urbanas, emergem como uma alternativa potencial para aprimoramento do solo, alinhando-se

às diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes sobre a viabilidade do solo-cimento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da adição de cimento e pó de vidro nas propriedades físicas e mecânicas de um solo siltoso da formação Guabirotuba, localizado na cidade de Curitiba/PR.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Determinar a influência da adição de cimento e pó de vidro nos limites de Atterberg e no índice de plasticidade.
- Investigar as alterações causadas na classificação do solo com a incorporação de cimento e pó de vidro.
- Analisar a variação na densidade máxima e na umidade ótima do solo ao adicionar diferentes teores de cimento e pó de vidro.
- Identificar os coeficientes associados ao cimento e ao pó de vidro nas equações regressivas e avaliar a sua contribuição para a resistência à tração e compressão do solo em tempos de cura de 28 e 90 dias.

## **1.2 Justificativa**

A crescente necessidade de práticas sustentáveis, sobretudo na engenharia civil, é resultado da escassez de recursos naturais e do comprometimento em reduzir os impactos ambientais. Nesta perspectiva, a reutilização de materiais tem se destacado na engenharia geotécnica, principalmente pela necessidade de adaptação dos solos às condições variáveis dos projetos de infraestrutura (BRITO, 2017).

Com o avanço de pesquisas surgiram os "novos materiais geotécnicos" que, incorporados ao solo, podem melhorar significativamente suas propriedades, abrindo possibilidades para técnicas geotécnicas inovadoras (DU et al., 2016). Em relação às normas brasileiras de melhoramento de solos, há uma urgente necessidade de

adaptá-las à integração de novos materiais, visando diminuir o uso intensivo de cimento e cal e, por conseguinte, os impactos associados (GIORGI et al, 2018).

As técnicas convencionais de melhoria de solo, como a adição de cal ou cimento, embora eficazes na estabilização e capacidade de carga dos solos, apresentam desafios ambientais, sobretudo nas emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da produção de cimento (JACKSON, 2020). Além disso, são necessárias técnicas que promovam a economia circular, reutilizando resíduos que, de outra forma, seriam destinados a aterros, gerando poluição e degradação ambiental.

O vidro, material inerte e durável, é um exemplo promissor de alternativa sustentável. Ao ser incorporado ao solo, pode melhorar sua resistência e funcionalidade (OLUFOWOBI et al., 2014). Mais especificamente, o pó de vidro, além de suas propriedades duráveis, possui estabilidade térmica e adesiva, tornando-se uma escolha viável na pavimentação e, potencialmente, reduzindo os custos de construção (Ardeshir, 2013).

Em termos econômicos, otimizar a utilização do solo local, por meio da estabilização química e mecânica, pode resultar em economias significativas. O pó de vidro, em particular, apresenta-se como uma opção de baixo custo e elevado potencial devido à sua ampla disponibilidade e capacidade de melhorar as propriedades do solo (SHAO et al, 2015).

Assim, a busca por práticas mais sustentáveis na engenharia civil torna-se essencial, considerando as perspectivas ambientais, econômicas e tecnológicas. A incorporação de novos materiais, como o pó de vidro, representa uma abordagem promissora nesse sentido, alinhando inovação e responsabilidade ambiental. (BALDOVINO, 2021)

### **1.3 Delimitação da Pesquisa**

O estudo foi conduzido no período de 2021 a 2023, utilizando como material de base o solo proveniente da formação Guabirota, coletado na região do bairro Capão Raso, localizado na região sudoeste da capital do estado do Paraná. Houve a colaboração de uma vidraçaria local para o fornecimento de resíduos de pó de vidro, e da equipe de pavimentação da Prefeitura, que disponibilizou solo de um trecho experimental da rua Marechal Rondon com defeitos em sua pavimentação.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). As variáveis controladas nesta pesquisa foram a porcentagem de pó de vidro e cimento, o peso específico do solo e o teor de umidade de moldagem de amostras.

Além disso, foram utilizados softwares de análise estatística para avaliar a influência do pó de vidro e do cimento com a resistência mecânica dos ensaios de compressão simples e à tração por compressão diametral da mistura. Os ensaios foram realizados para simular uma aplicação como um material utilizado para ser aplicado como base de pavimento. Os testes de resistência foram realizados no Laboratório de Estruturas da UTFPR e a análise microscópica das amostras ocorreu no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da mesma universidade.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A formação dos solos no Brasil é resultado de um complexo conjunto de processos geológicos, climáticos e biológicos. Para a geotecnia, é de suma importância compreender a caracterização dos solos, a fim de entender o comportamento e as propriedades desses materiais em projetos de construção e obras de infraestrutura (PENA, 2020).

No território brasileiro, a formação dos solos é influenciada por fatores geológicos, incluindo a natureza das rochas precursoras, os processos de intemperismo e erosão, bem como pelas características climáticas e vegetação regional. Como resultado, diferentes regiões do país exibem solos com propriedades distintas (MACHADO; MALINOVSKI, 1986).

Mesmo dentro de uma mesma região, as características dos solos podem variar consideravelmente devido a diferenças locais nos processos de formação e à influência de agentes externos, como a intervenção humana. Essas variações podem afetar significativamente o comportamento geotécnico dos solos e, portanto, devem ser consideradas de maneira criteriosa em projetos de engenharia civil e geotécnica no país. (CARAMEZ; 2017).

O tópico deste capítulo apresenta aspectos associados às técnicas de melhoramento de solos utilizadas para obras de infraestrutura. São citadas técnicas tradicionais de estabilizadores químicos e o produto de reações esperado. Além disso, são abordadas considerações sobre o impacto dos aditivos na resistência mecânica das misturas, levando em conta a análise estatística resultante dos ensaios realizados.

### 2.1 Melhoramento de Solos

No universo da engenharia geotécnica, quando os solos naturais não atendem aos requisitos ou especificações estabelecidas pelo projeto, diversas abordagens têm sido propostas ao longo do tempo para lidar com essa questão. Medina (1987) identificou algumas soluções viáveis, dentre elas, a possibilidade de evitar ou contornar solos problemáticos, a remoção de solos indesejados seguida da substituição por materiais de qualidade superior, a adaptação do projeto às condições do solo, ou ainda, a estabilização dos solos existentes. Kawahashi et al. (2010)

ressaltaram que a estabilização do solo surge como um método eficaz, de rápida execução e economicamente vantajoso, quando comparado à remoção e substituição de tais solos, em virtude dos custos associados à escavação e transporte.

Essa estabilização, conforme definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT,1995), engloba o conjunto de procedimentos físicos, químicos ou mecânicos aplicados ao solo, visando aprimorar ou manter suas características geotécnicas. Oliveira (2010) acrescentou que esse processo tem por finalidade a melhoria de propriedades como resistividade, deformação e permeabilidade.

Nesse sentido, o autor incluiu duas terminologias relevantes: solo estabilizado, quando se observa um incremento significativo na resistência após o tratamento; e solo melhorado, quando a adição busca otimizar aspectos como a redução da plasticidade, expansão e contração, sem, contudo, acarretar um aumento expressivo na resistência.

O escopo da estabilização do solo reside também em aprimorar as propriedades geotécnicas, tais como: estabilidade volumétrica, resistência mecânica, durabilidade e permeabilidade, por meio de processos naturais e artificiais, com o objetivo de garantir a integridade e conformidade ao longo da vida útil das obras geotécnicas (FRANGUINHA, 2007). Por intermédio desse processo, é possível aprimorar a qualidade dos materiais disponíveis, possibilitando a reutilização de materiais provenientes de escavações, o que resulta na redução de desperdícios, tanto de recursos energéticos quanto ambientais, relacionados ao transporte e exploração de jazidas (CASTRO et al., 2011).

A estabilização pode ser executada por meio de abordagens mecânicas, físicas, químicas, elétricas ou térmicas. A escolha do método apropriado deve levar em consideração as particularidades do solo, as propriedades alvo para aprimoramento, a tecnologia de execução, bem como os custos relacionados à estabilização e subsequente manutenção (FRANGUINHA, 2007).

Proctor, em 1933, salientou a interdependência entre variáveis como energia de compactação, densidade e umidade, observando que elevados teores de umidade estão correlacionados à obtenção da densidade seca máxima durante o processo de compactação (DAS, 2014; PICHA, 2016). O alcance da umidade ótima e máxima compactação resulta em aprimoramentos na resistência ao cisalhamento e capacidade de carga do solo, além de reduzir sua permeabilidade à água e susceptibilidade ao encolhimento (PATRICIO, 2015).

A estabilização física se dá mediante a modificação das propriedades do solo por meio de ajustes em sua granulometria, por meio da adição de diferentes frações granulométricas, promovendo assim, um contato mais eficiente entre os grânulos, o que culmina em um produto mais estável em comparação ao solo original (SOLIZ, 2007). Oliveira (1994) complementa ao mencionar que métodos associados à estabilização física podem envolver processos de eletrólise, aplicação de calor e eletroterapia osmótica.

Essa etapa do processo implica na mistura mecânica de diferentes tipos de solo, frequentemente com acréscimo de materiais granulares. A compactação controlada se mostra essencial nesse procedimento, proporcionando uma elevação substancial na densidade e capacidade de suporte do solo. A estabilização mecânica tem por objetivo otimizar as propriedades mecânicas do solo através da compactação, que compreende a aplicação de cargas contínuas para reduzir a porosidade e aumentar a resistência mecânica (OYELAMI; VAN ROOY, 2016; SOLIZ, 2007).

A estabilização mista engloba abordagens que combinam técnicas químicas e mecânicas, aproveitando os benefícios de ambas. Essa estratégia é frequentemente empregada em solos de baixa qualidade, nos quais a aplicação isolada de uma técnica pode não ser suficiente para atender às especificações requeridas. A seleção da técnica de aprimoramento é determinada pela natureza e intensidade das cargas que a estrutura de pavimentação suportará. Solos sujeitos a cargas elevadas demandam técnicas mais robustas (MAIA, 2016).

Fatores econômicos, tais como custos e disponibilidade de materiais, juntamente com impactos ambientais, influenciam diretamente na seleção das técnicas aplicadas em campo. Além da escolha do mecanismo apropriado, aspectos como características do solo, carga prevista e viabilidade econômica devem ser criteriosamente ponderados (BAIA, 2019).

Por outro lado, a estabilização química consiste na introdução de produtos químicos específicos, cimentados ou não, capazes de promover modificações nas propriedades do solo, influenciando na permeabilidade, resistência mecânica e deformabilidade (PATRICIO, 2015). Nesse processo, desencadeia-se uma reação química entre o aditivo e os minerais presentes no solo ou na água, que culmina na formação de novos compostos (OLIVEIRA, 1994). Esta técnica implica na incorporação de agentes químicos no solo e alterações das suas características físicas e químicas. Cal, cimento e polímeros figuram como exemplos comuns de

agentes utilizados. Tal abordagem demonstra eficácia particularmente em solos expansivos ou com elevado teor de umidade (NASCIMENTO, 1970).

Conforme Medina (1987 apud SOLIZ, 2007, p. 25), na estabilização química, a mistura estabilizadora do solo pode formar uma matriz contínua ou descontínua no solo. No caso de uma matriz contínua, o agente estabilizante preenche todos os espaços vazios e partículas, e o solo se comporta como um enchimento inerte. Por outro lado, na formação de uma matriz descontínua, nem todos os espaços vazios são preenchidos, ocorre modificações na superfície das partículas subatômicas, que resultam no fechamento inerte dos espaços vazios e na agregação das partículas.

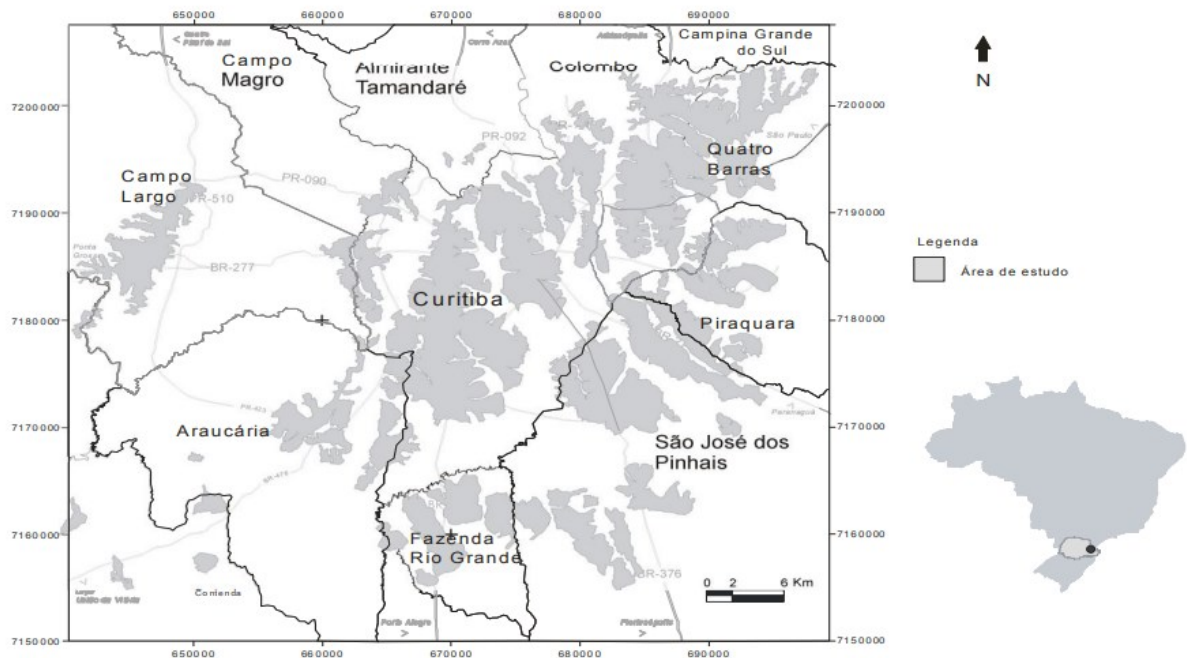
Os principais estabilizadores químicos aplicados para aprimorar as propriedades do solo são: o cimento Portland e a cal. O cimento confere um ganho imediato de resistência, o qual se desenvolve ao longo do período de endurecimento de 28 dias, em virtude das reações e da hidratação do cimento. Ademais, o cimento também aprimora a trabalhabilidade, reduz a plasticidade e a variação volumétrica do solo. Apesar de aplicável em distintos tipos de solo, o cimento Portland encontra uso mais difundido em solos granulares (DIAS, 2012; LITTLE; NAIR, 2009; SILVA, 2016).

Dias (2012) também elucida a ocorrência de reações físicas e químicas na mistura estabilizadora do solo, como reações químicas de carbonatação, dissolução, troca catiônica, oxidação, precipitação e polimerização, além de reações físicas de hidratação, evaporação, variação de temperatura e adsorção.

## **2.2 Formação Guabirota**

A Bacia Sedimentar da Formação Guabirota está situada na porção centro-sul do Primeiro Planalto Paranaense, abrangendo uma área de aproximadamente 3.000 Km<sup>2</sup>, delimitada pelos paralelos 25° 15'00" e 25° 55'00" de latitude sul e pelos meridianos 49° 00'00" e 49° 35'00" de longitude oeste, englobando Curitiba (PR) e os municípios circunvizinhos que compõem a Região Metropolitana de Curitiba, conforme ilustrado pela Figura 1 (KORMANN, 2002).

**Figura 1 - Região da formação Guabirotuba**



**Fonte: Adaptado de Chiossi (2013).**

A nomenclatura "Guabirotuba" foi atribuída por Bigarella e Salamuni (1962) para descrever a formação como um depósito composto por argila, sísto-argiloso, silto-argiloso, arenoso e conglomerado, com alguns horizontes calcários interpretados como margas. (DE LIMA et al., 2013).

A Formação Guabirotuba é majoritariamente constituída por argilitos e arcósios, além de conter depósitos rudáceos e pequenos horizontes de caliche, anteriormente interpretados como margas pelos mesmos autores (Bigarella e Salamuni, 1962). Paralelamente aos argilitos, ocorrem areias arcósicas (de 20 a 40% de feldspato) e arcósios em camadas descontínuas e lenticulares, apresentando espessuras muito variáveis. E também, depósitos de cascalho podem ser encontrados nas bordas da bacia.

Pela geologia, a predominância dos argilitos em sua litologia é responsável pela coloração dos solos, que variam de cinza esverdeado a esbranquiçado. São bem compactados, apresentam texturas predominantemente maciças e granulação muito fina, com grãos de areia dispersos em sua massa (Salamuni, 1999). A fração argila é majoritariamente representada pelo grupo das esmectitas (Mineropar, 1994), contendo, ocasionalmente, partículas siltosas ou arenosas em proporções variáveis, além de grãos de feldspato, por vezes, caulinizados.

Nas camadas mais superficiais sujeitas a processos de laterização incipiente ou plintificação, a consistência tende a diminuir, que resulta em variações cromáticas para tons amarelados ou avermelhados. Estes processos lateríticos refletem alterações no regime climático durante a evolução da Bacia de Curitiba (Salamuni, 1999). Adicionalmente, argilominerais do grupo da caulinita passam a ter maior representatividade na composição do material, que coexistem com hematita e gibbsita (Fortin et al., 1989).

A formação geológica predominantemente constituída por sedimentos plio-pleistocênicos foi depositada no período Permiano, aproximadamente entre 299 e 252 milhões de anos atrás. Em sua composição mineralógica, observam-se predominantemente quartzo, feldspato, mica e argilominerais, cujas proporções relativas podem variar, influenciando nas características físicas e químicas do solo (KORMANN, 2002).

Esta formação encontra-se abaixo do embasamento proterozóico, caracterizada por camadas de solo argiloso. Os lamitos, rochas sedimentares originadas da litificação de silte e argila, constituem o estrato predominante da Formação Guabirota e apresentam espessuras que variam entre 1 e 85 metros, com uma média de 40 metros de profundidade (SALAMUNI et al., 1999).

A composição mineralógica das argilas da Formação Guabirota pode variar de acordo com a localização geográfica dentro da formação, mas, geralmente, é composta por minerais de argila do grupo das ilitas e montmorilonitas, bem como, minerais de argila do grupo das caulinitas (MINEROPAR, 1994). A presença de argilas expansivas na Formação Guabirota pode ser atribuída à ocorrência de processos geológicos específicos, tais como: intemperismo de rochas ricas em minerais de argila, ação de águas subterrâneas e deposição sedimentar. No entanto, a expansibilidade das argilas da Formação Guabirota pode variar consideravelmente entre diferentes áreas e camadas dentro da formação (FELIPE, 1999).

Conforme Pinto (1998), a expansibilidade do solo está associada a grandes variações volumétricas (expansão ou contração) em resposta à variação de umidade. Este comportamento é, principalmente, causado por agentes físico-químicos em solos minerais argilosos, como a esmectita. A carga superficial da esmectita interage de maneira ativa com as moléculas polares de água, e a movimentação de grande área é frequentemente associada a alterações na sucção próxima à superfície (LYTTON, 1994).

A composição mineralógica das argilas da Formação Guabirotuba, caracterizada pela presença de esmectita, é representativa de materiais expansivos. Segundo Chen (2012), solos expansivos tornam-se potencialmente instáveis quando seu teor de umidade natural é inferior a 15%. A maioria das expansões produz até 30% de umidade. A adição subsequente de água tende a reduzir as variações de volume.

Por outro lado, quando as argilas da Formação Guabirotuba se encontram secas, a superfície exposta tende a adquirir uma consistência pastosa. Após o contato com a água, inicia-se um processo de erosão, seguido pela subsequente secagem. Neste contexto, quando a água entra em contato com o solo, este se desintegra, iniciando um processo erosivo. Este fenômeno é mais comum em solos ou rochas opulentas, isto é, ricas em minerais. Enquanto a porção externa do fragmento de solo embebido em água começa a saturar, o ar aprisionado é submetido a uma pressão que rompe o material (TERZAGHI et al., 1996). Conforme destaca Filipe (1999), a remoção das camadas superficiais do solo expõe os sedimentos instáveis da Formação Guabirotuba, que desencadeiam processos erosivos na região.

Os processos de formação do solo resultam da separação e decomposição das rochas devido ao intemperismo. As alterações nas rochas podem ocorrer tanto de forma física quanto química. No processo de fragmentação devido às variações de temperatura e pressão, conhecido como processo físico, a superfície exposta aumenta, ampliando o contato com o ar e a água, potencializando, assim, os efeitos dos processos químicos atmosféricos. Neste processo, as principais reações químicas que ocorrem são: hidratação, hidrólise, oxidação, carbonatação e complexação (FRANGUINHA, 2016; TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2009).

Quanto à origem da composição, os solos podem ser classificados de duas formas, a saber: solos residuais, que provêm de rochas intemperizadas e permanecem no local de sua formação; e solos transportados, que são produtos de rochas intemperizadas, mas foram transportados para outro local de transformação. Durante o processo de formação do solo, perfis distintos são estabelecidos (CHIOSSI, 2013).

No que se refere à constituição mineralógica, a fração de argila é majoritariamente composta por minerais de caulinita, óxido de ferro e/ou alumínio, exibindo alta porosidade. Por sua vez, os solos saprolíticos originam-se da decomposição e desagregação in situ da rocha matriz, sob a influência de agentes

intempéricos, e mantêm a estrutura da rocha que lhe deu origem (VILLIBOR et al., 2009).

A ABNT (1995) define a laterização como um processo de formação de solos típicos de climas quentes e úmidos, caracterizado pela elevada concentração de óxidos e hidróxidos, principalmente de alumínio e ferro, cuja concentração aumenta em relação à lixiviação da sílica ou à adição destes óxidos e hidróxidos. O solo saprolítico é resultante da alteração *in situ* da rocha em estágio avançado de desintegração, que apresenta uma constituição variável e acentuada heterogeneidade.

O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), desenvolvido por Arthur Casagrande na década de 1940, é realizado com base em dois critérios principais: tamanho dos grãos e características do material. Esta classificação é subdividida em dois grupos principais: solos com tamanho de grãos maiores que 0,075 mm (solos granulares) e solos com tamanho de grãos menores que 0,075 mm (solos finos). Dentro destes grupos, os solos granulares são categorizados em quatro classes: cascalho, areia, silte e argila. Cada classe é identificada com base na porcentagem de grãos de cada tamanho presente na amostra. Já os solos finos são classificados de acordo com o teor de argila presente na amostra. As principais classes são: argilas de baixa a média compressibilidade (CL), argilas altamente compressíveis (CH), siltes orgânicos (OL), argilas orgânicas (OH) e lodos orgânicos (Pt).

A heterogeneidade dos solos da Formação Guabirotuba pode induzir variações no comportamento mecânico. Alguns estratos podem ser mais susceptíveis a deformações, ao passo que outros podem apresentar maior capacidade de suporte. Dada a presença de argilitos na Formação Guabirotuba, os solos desta região podem ser mais propensos à erosão hídrica. Um sistema de drenagem eficiente é essencial para prevenir o acúmulo de água e assegurar a estabilidade a longo prazo das estruturas de pavimentação (CHAMECKI, 2002).

Devido à baixa capacidade de suporte de carga e alto grau de expansão desses solos devido às suas propriedades físico-mecânicas, eles não são utilizados em obras de construção civil, sendo comum a técnica de estabilização dos solos com materiais de cimento (Baldovino et al., 2020).



## 2.3 Estabilizantes tradicionais

### 2.3.1 Cimento

Conforme descrito por Meuse et al. (2017), a identificação de solos fofos e moles é fundamental no âmbito da construção de infraestruturas e rodovias, visto que a utilização desse tipo de material natural é inviável por razões tecnológicas, econômicas e ambientais. Portanto, a identificação e tratamento desses solos são primordiais, e a adição química e geossintética de cal e cimento Portland emerge como uma solução eficaz de melhoramento.

O cimento é um ligante amplamente empregado na construção civil devido às suas propriedades de endurecimento e resistência. Trata-se de um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem de clínquer, uma mistura de calcário e argila, adicionada de outros componentes como gesso e pozolanas. Quando em contato com água, o cimento forma uma pasta que, ao endurecer, adquire resistência mecânica (BASTOS, 2017).

Segundo Segantini (2000), as principais aplicações de solos estabilizados com cimento incluem a fabricação de tijolos, uso como material para base e sub-base de pavimentação, revestimento de barragens de terra, pavimentação de pátios industriais e estacionamentos de veículos, construção de silos aéreos e subterrâneos, e em canais de irrigação, entre outros.

Na estabilização do solo com cimento, o objetivo é produzir o solo-cimento, um produto resultante da mistura de solo, cimento e água. Essa mistura é produzida com uma dosagem adequada, determinada por ensaios de laboratório e é compactada no teor ótimo de umidade e sob a máxima densidade, adquirindo resistência e durabilidade por meio das reações de hidratação do cimento (ABCP, 1986).

A adição de cimento Portland é altamente recomendada para a estabilização de solos arenosos e, em alguns casos, solos lodosos e argilosos, com exceção daqueles com alto teor orgânico. Ghadir e Ranjbar (2018) destacam que o uso de cimento para estabilização do solo proporciona maior resistência, durabilidade e redução da compressibilidade, sendo frequentemente empregado em bases e contrapisos de pavimentos, devido à sua natureza frágil.

Misturas de argila e cimento têm se mostrado vantajosas para aumentar a resistência em solos arenosos e argilas de baixa plasticidade e representam o tipo mais comum de estabilização. Entretanto, em solos finos e plásticos, as forças de

ligação entre as partículas podem dificultar a mistura com o cimento, tornando a cal mais eficaz nesses casos, uma vez que ela quebra essas ligações e transforma as menores partículas do solo em partículas dispersas (SALES, 2022).

A prática da estabilização do solo com cimento teve seu início nos Estados Unidos por volta de 1935 e, no Brasil, foi utilizada desde 1945, quando empregada na construção de uma casa de bombas para abastecimento das obras do porto de Santarém (PA). Nesse contexto, a adição de cimento Portland é classificada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes como um estabilizador químico capaz de reduzir a maleabilidade do solo e torná-lo menos vulnerável aos efeitos da água (DNIT, 2010).

Conforme mencionado por Segantini (1994) e Rizzo & Lollo (2006), a adição de cimento ao solo reduz a quantidade de vazios à medida que ocorre a cimentação entre os poros e interação com as partículas do solo. Isso tende a aumentar o peso específico seco do solo estabilizado e resulta em uma pequena elevação no teor de umidade ótimo em comparação com o solo natural. Porém, segundo Adaska (1985), o solo-cimento pode apresentar contração e eventuais fissuras quando sujeito ao ressecamento.

Diversos pesquisadores têm se dedicado à investigação da resistência mecânica do solo estabilizado com cimento, especialmente quando compactado nas condições ideais de gravidade específica seca máxima e umidade ótima. Horpibulsuk et al. (2010) analisaram a relação entre resistência à compressão e microestrutura em argila de lodo estabilizada com cimento, considerando diferentes níveis de energia de compactação. Os resultados destacaram a variação da resistência à compressão e da microestrutura de acordo com as propriedades de compactação, teor de cimento e tempo de cura.

O teor de cimento na mistura desempenha um papel significativo na análise da estabilização. Estudos realizados por Horpibulsuk et al. (2012) em pilares de concreto evidenciaram melhorias na capacidade de suporte do solo e a redução de tensões em solos fortificados com maior teor de cimento. Modelagens físicas e numéricas indicaram que as mudanças na pressão dos poros ao redor do dreno são consideradas insignificantes. Observou-se que a resistência do solo estabilizado com cimento varia inversamente com o teor de água. Ou seja, à medida que o teor de água do cimento aumenta, a resistência à compressão do solo misturado diminui.

Ho et al. (2018) conduziram um estudo sobre o desenvolvimento da resistência mecânica em solos tratados com cimento considerando as interações entre hidratação do cimento, reação pozolânica, sucção durante a secagem e carbonatação de areia, argila e lodo do cimento. Os resultados indicaram um rápido aumento da resistência no curto prazo, possivelmente devido ao efeito da sucção e carbonatação durante a secagem, enquanto um leve aumento na resistência no longo prazo pode ser explicado pela presença de forte sucção e reação pozolânica. A resistência à compressão, única de todas as misturas, aumentou significativamente devido à redução dos microporos totais, resultante dos efeitos da carbonatação e sucção.

Os principais constituintes do cimento Portland, conforme Petrucci (2005), são cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e a magnesita (MgO), álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O) e sulfatos (SO<sub>3</sub>). Dentre esses componentes, os quatro primeiros são os principais e derivam os compostos mais relevantes para as propriedades do produto. Segundo Neville (1997), os principais compostos do cimento Portland incluem o Silicato Tricálcico (C3S), o Silicato Dicálcico (C2S), o Aluminato Tricálcico (C3A) e o Ferroaluminato Tetracálcico (C4AF). Esses compostos, ao se hidratarem, cristalizam-se em três fases distintas: silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio ou etringita (AFt).

Segundo Mehta & Monteiro (2008), as AFt compõem cerca de 15 a 20% do volume da pasta endurecida, sendo a fase de menor destaque para o desenvolvimento das propriedades da pasta. Durante os primeiros estágios da hidratação, a reação sulfato/alumina favorece a formação de etringita. Os C-S-H representam entre 50 e 60% do volume de sólidos da pasta hidratada de cimento Portland, sendo responsáveis pelas resistências mecânicas adquiridas após o endurecimento. A composição química dos C-S-H varia de acordo com a relação água/cimento, temperatura e idade de hidratação. Já os CH, também conhecidos como portlandita, constituem 20 a 25% do volume de sólidos da pasta hidratada e, diferentemente dos C-S-H, apresentam estequiometria definida, Ca(OH)<sub>2</sub>, resultando na formação de grandes cristais com uma morfologia prismática hexagonal (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

No contexto da estabilização do solo com cimento, a adição desse material visa, em suma, melhorar as propriedades geotécnicas do solo, tornando-o mais resistente e estável. O cimento preenche os espaços vazios entre as partículas do

solo, formando uma matriz rígida que aumenta a capacidade de suporte do solo e reduz sua compressibilidade (CRISTELO, 2015).

Os impactos ambientais negativos produzidos durante a produção de cimento (principalmente emissões de CO<sub>2</sub>) e do uso de recursos naturais como rocha de calcário, esses aspectos têm levado a área de estabilização de solo a buscar soluções alternativas para melhorar as propriedades de engenharia dos solos usando ligantes como pozolanas naturais, cinzas volantes, fibras (naturais e sintéticas), resíduos de construção e demolição, e novas técnicas como biocimentação, biocolmatação e geopolimerização (Ivanov & Chu, 2008).

Desta forma, estudos sobre dosagem de solo-cimento visando encontrar as menores quantidades de cimento necessárias e o esforço de compactação no campo são necessários para reduzir o consumo indiscriminado do ligante quando é necessário utilizá-lo em obras de engenharia, seja por motivos econômicos, de trabalhabilidade, acesso, durabilidade do material ou eficiência (Baldovino et al., 2018b; Baldovino & Izzo, 2019).

### 2.3.2 Pó de vidro (pozolanas)

A substituição de estabilizadores químicos por subprodutos industriais tem emergido como uma alternativa viável para o aprimoramento geotécnico do solo. Entre esses subprodutos, destacam-se as pozolanas, tais como cinza volante, cacos de vidro, escória de forno e cinza de casca de arroz (MASSAZZA, 2004; SILVA, 2016).

Os vidros tradicionais pertencem à classe de materiais cerâmicos. Dentre suas aplicações estão recipientes, lentes, fibras de vidro, tanto para reforço como em comunicação, janelas e fachadas de prédios. Os vidros mais comuns são produzidos à base de sílica e contém outros óxidos, especialmente CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que definem suas propriedades. As suas principais características são: a transparência óptica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (CALLISTER, 2008).

Os cacos de vidro têm sido empregados na indústria da construção como pozolanas complementares. As pozolanas são materiais de natureza silicosa ou alumino-silicosa que, quando combinados com cal hidratada e água, formam compostos com propriedades cimentícias. A adição de cacos de vidro como pozolana pode aprimorar as características do concreto e da argamassa, tais como resistência, durabilidade e sustentabilidade (MASSAZZA, 2004).

Esses cacos de vidro exibem características químicas e físicas adequadas para exercerem sua função como pozolanas. A presença de sílica no vidro é a principal responsável por sua reatividade pozolânica. Durante o processo de hidratação, os compostos pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento, resultando na formação de produtos adicionais de hidratação, como os silicatos de cálcio hidratados (CSH), os quais contribuem para a resistência e durabilidade do material estabilizado (MARCON, 2015).

Os vidros pertencem à categoria de materiais cerâmicos amorfos, compostos por silicatos não cristalinos e outros óxidos, tais como óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e óxido de alumínio ou alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), os quais exercem influência sobre suas propriedades (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). O pó de vidro, por sua vez, consiste em partículas finamente moídas de vidro (AKERMAN, 2000).

As propriedades físicas e químicas do vidro podem variar consideravelmente de acordo com sua composição e o processo de fabricação. A sílica é o componente predominante, conferindo ao vidro sua estrutura amorfa. Adicionalmente, outros óxidos, como o óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) e o óxido de cálcio (CaO), podem ser adicionados para ajustar suas características (AKERMAN, 2000).

A incorporação de pó de vidro como aditivo para o solo proporciona aprimoramento das propriedades geotécnicas, incluindo aumento da resistência e da estabilidade. A reatividade pozolânica dos cacos de vidro com o solo desencadeia a formação de produtos de hidratação que melhoram a coesão e a capacidade de suporte do solo estabilizado. Além disso, a utilização do pó de vidro como aditivo pode representar uma forma sustentável de reciclar resíduos de vidro, contribuindo para a redução do impacto ambiental na indústria da construção (AKERMAN, 2000; DU et al., 2016).

Em relação à construção, os vidros são materiais não biodegradáveis e completamente recicláveis. Contudo, a eficiência da reciclagem requer a devida separação, limpeza e a garantia de mesma composição, pois vidros com diferentes composições não podem ser misturados (BUSCH, 2016; SHAYAN, 2014, 2004).

Diversos estudos têm investigado a utilização do pó de vidro em diversas áreas da construção, como isolamento térmico, espumas, tecidos, microesferas, produção de blocos de vidro, tintas reflexivas, enchimentos, matérias-primas asfálticas e aplicações artísticas (MOHAJERANI et al., 2017). Esse material apresenta

propriedades físicas notáveis, sendo transparente, rígido, quebradiço e com baixa condutividade térmica (FARID, 2018).

As pozolanas podem ser classificadas em naturais, com origem vulcânica ou sedimentar, e artificiais, resultantes de tratamento térmico ou provenientes de subprodutos industriais. O pó de vidro enquadra-se como uma pozolana artificial, devido a seu alto teor de sílica e natureza amorfa, cumprindo, assim, os requisitos essenciais para esse tipo de material (SHAO et al., 2015).

A utilização do pó de vidro na estabilização de solos foi objeto de extenso estudo no meio acadêmico. Mohajerani et al. (2017) observaram em suas pesquisas que a reciclagem de vidros provenientes de aterros sanitários para a produção de novas materiais geotécnicos totalmente compostas por material reciclado mostrou-se inviável, devido às disparidades na composição química desses materiais. Entretanto, o vidro tem sido amplamente reciclado ao ser incorporado na fabricação de novas peças vítreas, resultando em um menor consumo energético no processo de produção e uma redução nas emissões de gases poluentes. Segundo dados da ABIVIDRO (2013), a simples adição de 10% de resíduo de vidro na produção de novas peças resulta em uma economia de 4% na energia total, reduzindo o consumo de CO<sub>2</sub> em 5% e o de água em 9,5%.

No âmbito acadêmico, foram encontradas diversas aplicações para os resíduos de vidro. Scheuermann Filho (2019) relata a sua utilização em estudos que visavam a substituição parcial e/ou total de agregados finos em concreto com cimento Portland, bem como a incorporação de vidro moído em misturas de concreto asfáltico como agregado e/ou material de preenchimento (filler). Além disso, o pó de vidro foi empregado em misturas com materiais pétreos para bases e sub-bases de pavimentos, na fabricação de fibras a partir de resíduos de vidro e na adição destas em concretos ultraleves, além de ser utilizado como ligante pozolânico. Wartman et al. (2004) mencionam a possibilidade de empregar o vidro moído em diversas aplicações, como em bases e sub-bases de pavimentos, aterros, preenchimentos estruturais, não estruturais e em estruturas de contenção, entre outras.

Ganiron Jr. (2013) avaliou a utilização de garrafas de vidro moídas como agregado fino em concretos, variando os teores de substituição da areia por pó de vidro de 25%, 50%, 75% e 100%. O autor identificou que o uso do vidro tem o potencial de reduzir a relação água/cimento em algumas proporções, resultando na redução dos custos de produção do concreto. Contudo, a adição de vidro resultou em um

concreto com menor módulo de elasticidade, o que desaconselha sua utilização em concretos com finalidades estruturais.

Salamatpoor e Salamatpoor (2017) investigaram o efeito da adição de vidro granular em areias artificialmente cimentadas, por meio de ensaios triaxiais e de resistência à compressão simples. Os resultados indicaram que o aumento da porcentagem de vidro resultou em um aumento do ângulo de atrito interno e da coesão, conferindo ao material uma maior resistência à compressão.

Mohajerani et al. (2017) também mencionam a utilização do pó de vidro moído como substituto parcial do cimento em concretos. A análise dos resultados obtidos por diversos autores indicou, na maioria dos casos, uma redução na resistência das argamassas quando o cimento foi substituído pelo pó de vidro após 28 dias de cura.

Embora os vidros possam ser reciclados na produção de novos vidros, parte significativa do material acaba retornando contaminado devido ao processo de descarte, tornando a reciclagem em vidros novos inviável (IKARA, 2015). O vidro proveniente de garrafas e janelas possui cerca de 75% de sílica em sua composição, e de acordo com Ghasabkolaei et al. (2017), a sílica é um componente frequentemente presente em estudos de estabilização de solos, sendo predominantemente encontrada no vidro (BENNY, 2017). Além disso, o pó de vidro proveniente da indústria possui propriedades interessantes para a engenharia civil, como alta permeabilidade, alta resistência ao esmagamento e baixa rigidez de tensão (IKARA, 2015).

A aplicação criteriosa do pó de vidro como aditivo para o solo proporciona melhorias significativas nas propriedades geotécnicas, contribui para o aprimoramento do material e possibilita a reciclagem de resíduos de vidro, o que favorece a sustentabilidade na indústria da construção. A correta utilização desse subproduto industrial pode conferir benefícios relevantes em termos de resistência, durabilidade e estabilidade do solo estabilizado (DU et al., 2016).

## **2.4 Parâmetros de resistência do solo**

Ao considerarmos a aplicação do solo na pavimentação de estradas e rodovias no Brasil, diversos parâmetros de resistência mecânica se tornam relevantes. Um dos mais significativos é o Índice de Suporte Califórnia (CBR), o qual avalia a

capacidade do solo de sustentar cargas e tem sido o mais utilizado para dimensionamento de pavimentos.

A norma DER/PR – ES-P 07/05 estabelece especificações para pavimentações com camadas estabilizadas granulometricamente. Nesse caso, os principais requisitos incluem CBR superior a 80% para solos com N (número de golpes de compactação) superior a  $5 \times 10^6$ , ou CBR superior a 60% se N for inferior a esse valor. Além disso, a abrasão Los Angeles deve ser inferior a 55%, o índice de plasticidade (IP) deve ser menor que 6%, e o limite de liquidez (LL) não deve ultrapassar 25%. Essas especificações visam garantir a resistência do solo e sua capacidade de manter a integridade da pavimentação sob pressão.

A norma DER/PR – ES-P 09/05, por sua vez, aplica a pavimentação com solo arenoso-brita. Novamente, o CBR é um fator chave, com valores acima de 80% para N superior a  $5 \times 10^6$  e acima de 70% para N inferior a esse valor. Além disso, a abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50%, e o material deve ser arenoso. A especificação do ensaio de lamelaridade é importante para garantir a textura adequada do solo.

Para bases de solo de comportamento laterítico e brita descontínua, a norma SLBD – ET – DER P00/003 (2005) estipula CBR superior a 80% se N for maior que  $5 \times 10^6$ , e superior a 70% se N for menor. Além disso, requisitos de forma (índice de forma  $> 0,5$ ) e granulometria são fundamentais para garantir a estabilidade da base.

No campo da geotecnia, os ensaios de resistência à compressão simples têm sido usados na maioria dos programas experimentais para verificar a eficiência da estabilização do solo com cimento e para estudar os fatores de influência na resistência mecânica dos solos cimentados (CONSOLI et al., 2011).

A norma DER/PR ES-P 11/18 avalia através da resistência à compressão simples da mistura, aos sete dias de idade, de acordo com os seguintes valores: solo tratado com cimento: de 1,2 a 2,1 MPa; solo-cimento: superior a 2,1 MPa. Dentre a temática de estabilizar solos expansivos e melhorar a capacidade de suporte, algumas pesquisas têm se mostrado bem sucedidas, podendo ser citadas abaixo.

Na pesquisa conduzida por Rizgar et al. (2020), que objetivou a estabilização de solos expansivos, foram empregadas diferentes porcentagens de resíduo de vidro (2,5%, 5%, 10%, 15% e 25% da massa seca do solo), após trituração e mistura com a amostra de solo. Os resultados indicam que a inclusão do pó de vidro em solos expansivos exerce um efeito significativo na consistência e resistência ao cisalhamento da amostra de solo. Adicionalmente, os ensaios mostraram que a



estabilização com 15% de resíduo de vidro resultou em uma redução de aproximadamente 63% na espessura da sub-base. A proporção ótima de pó de vidro para valorização deste tipo de solo é em torno de 15%, em que a resistência à compressão simples nas amostras testadas aumentou aproximadamente 75,6%.

No estudo conduzido por Rabab'ah (2020) para a estabilização de solos expansivos, a adição de até 1% de fibra de pó de vidro também demonstrou ser eficaz. A inclusão da fibra de vidro no peso seco do solo resultou em um aumento da resistência e rigidez do solo, além da redução do potencial de expansão. A análise do software MEPDG revelou uma diminuição de 22,9% nas patologias da pista, e também uma redução de 60% na espessura da camada do subleito e uma economia de custos na execução da obra.

No trabalho de Baldovino et al. (2020), voltado para a estabilização de solos siltsosos com teores de cimento variando de 3% a 9% da massa seca do solo, foram mencionados requisitos de resistência americanada (TxDOT Pavement Design Guide de 2013). A resistência de compressão simples alvo não confinada para bases estabilizadas com cimento é de aproximadamente 300 Psi (ou 2100 kPa), enquanto para sub-base esse valor é reduzido para 1200 kPa. O estudo demonstrou que, em média, a adição de 5% de cimento em peso, com compactação acima de um peso específico seco de 14 kN/m<sup>3</sup>, viabiliza que ambos os estudados fossem potencialmente adequados para a construção de bases e sub-bases, em conformidade com os requisitos do DNIT 143 e do TxDOT.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Programa experimental

A consolidação da pesquisa apresentada foi estruturada em seis etapas distintas, conforme ilustrado no Quadro 1. A fase inicial da pesquisa implicou em uma revisão bibliográfica, com a finalidade de estabelecer as variáveis pertinentes ao estudo. Subsequentemente, a segunda fase foi direcionada para a aquisição, coleta e preparo dos materiais necessários à execução dos experimentos.

**Quadro 1 - Fluxograma do método de pesquisa**

<b>1</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	Estudo do tema e definição de variáveis				
<b>2</b>	<b>Coleta dos materiais</b>	Coleta e preparação do materiais para a realização de ensaios				
<b>3</b>	<b>Caracterização dos Materiais</b>	Análise Granulométrica NBR 7181:2018	<b>Solo</b>	<b>Cimento</b>	<b>Vidro</b>	<b>Mistura</b>
		Densidade Real DNER 093:1994	<b>Solo</b>	<b>Cimento</b>	<b>Vidro</b>	
		Limite de Liquidez NBR 6459:2017	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
		Limite de Plasticidade NBR 7180:2016	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
		FRX	<b>Solo</b>	<b>Cimento</b>	<b>Vidro</b>	<b>Mistura</b>
		MEV	<b>Solo</b>	<b>Cimento</b>	<b>Vidro</b>	<b>Mistura</b>
		Ensaio de compactação NBR 7182:2015	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
<b>4</b>	<b>Ensaio Laboratoriais</b>	Ensaio de RCS NBR 12770:1992	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
		Ensaio de RCD NBR 7222:2011	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
<b>5</b>	<b>Modelo de tendência</b>	Análise Multivariada - criação de tendencia de resultados de resistência a partir do isolamento das variáveis - Cimento e pó de vidro	<b>Solo</b>			<b>Mistura</b>
<b>6</b>	<b>Tratamento de resultados</b>	Análise de dados junto a bibliografia e comparativo de resultados.				

**Fonte: O autor (2023).**

A terceira etapa envolveu a análise da distribuição granulométrica dos materiais, com determinação do limite de Atterberg do solo e da mistura solo-cimento-vidro, além de ensaios de densidade real das partículas (Gs) e análise microscópica das partículas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).

Na quarta etapa, foram realizados ensaios laboratoriais para obter informações sobre a resistência mecânica do solo, tanto em seu estado natural quanto estabilizado, através de testes de resistência à compressão simples (RCS - qu) e resistência à tração diametral (RCD - qt).

A penúltima etapa consistiu na análise dos dados obtidos e no processamento estatístico, permitindo identificar tendências nos resultados de resistência mecânica em relação às variáveis estudadas, obtendo modelos de regressão.

Finalmente, a etapa final foi dedicada à obtenção de conclusões a respeito da pesquisa, consolidando os resultados e as descobertas alcançadas ao longo do estudo.

**Quadro 2 - Fluxograma das variáveis de pesquisa**

VARIÁVEIS INDEPENDENTES		VARIÁVEIS FIXAS		VARIÁVEIS DEPENDENTES	
ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 1	ETAPA 2
Teor de umidade		Tipo de solo		Resistência a compressão simples	
Teor de cimento		Tipo de cimento		Resistencia a tração por compressão diametral	
Teor de pó de vidro		Tipo de vidro		Peso específico	-
Densidade - solo/ cimento / pó de vidro		Velocidade de deformação		Umidade ótima	-
Tempo de cura		Temperatura			
		-	Peso específico		
		-	Umidade		

**Fonte: O autor (2023).**

Na primeira fase foram definidas as variáveis da pesquisa, que podem ser classificadas como variáveis independentes, fixas e dependentes. Tratando-se de pesquisas experimentais, variáveis independentes são aquelas que ao serem manipuladas, não alteram ou influenciam outras variáveis, consideradas o fator determinante. O oposto acontece com variáveis dependentes, que são afetadas ou mudam de acordo com variáveis independentes, sendo apenas medidas ou registradas. Variáveis constantes tratam-se de valores fixos que não sofrem alteração (PRODANOV; FREITAS, 2013).

A presente pesquisa foi dividida em duas etapas quanto à divisão de variáveis. Na etapa 1, o peso específico aparente máximo seco ( $\rho_{d,max}$ ) e a umidade ótima ( $W_{ot}$ ) foram variáveis dependentes. Para a etapa 2, estes valores foram fixados a fim de manter apenas a resistência mecânica como variável dependente, obtendo um modelo de padronização de dados para utilização em campo, conforme representado no quadro 2.

a) Das variáveis independentes:

**Teor de umidade:** massa de água dividida pela massa seca do material de estudo (massa de solo seco + a massa seca do cimento + a massa seca do vidro), expressa em porcentagem;

**Teor de cimento:** massa de cimento dividida pela massa seca do solo estudado, expresso em porcentagem. O teor analisado foi de 4% em relação ao solo seco na etapa 1, e variou de 0 a 8% na etapa 2. Conforme os estudos de Baldovino et al. (2019), Consoli et al. (2012), Olufowobi et al. (2018), Rizgar et al. (2021), utilizou-se em média de 2 a 10% de cimento e estes autores observaram incrementos de resistência nos solos testados. Dessa forma foi definido um teor de cimento, baseado nas médias utilizadas na bibliografia e no teor de utilização da aplicação em campo pela prefeitura e empresas de pavimentação da cidade de Curitiba, para associação com o PV;

**Teor de pó de vidro:** massa de vidro dividida pela massa seca do solo estudado, expressa em porcentagem. O teor analisado em relação ao solo seco foi de 1% na etapa 1. O valor foi mensurado com base em pesquisas em que 1% do teor já demonstrou melhoramento nas propriedades do solo. (RABAB'AH ,2020). Para a etapa 2, foi estabelecido um gradiente de 0 a 4%, a fim de mensurar o incremento nos valores de resistência mecânica com diferentes teores de pó de vidro.

O conteúdo de pó de vidro (PV) analisado na presente pesquisa foi selecionado com base nos resultados dos estudos de Baldovino (2018), como técnica de melhoramento de solo cimento utilizando o resíduo de pó de vidro e outros materiais pozzolânicos. Dessa forma, a escolha do uso dessas camadas visa orientar pesquisas sobre a possibilidade de utilização de pó de vidro mais baixos com ativação da atividade pozzolânica, atuando em prol da viabilidade técnica na aplicação relacionada à pavimentação.

**Densidades do solo, do cimento e do vidro:** expressa pela massa específica aparente seca máxima das misturas solo-cimento-vidro compactada;

**Tempo de cura:** tempo contabilizado em dias. Foram definidos tempos de cura de 0 e 28 dias tanto para os ensaios de compressão simples, quanto para os de módulo de resiliência. Conforme descrito por Benny (2017), Baldovino (2021b), Rocha (2018) e Bordignon (2015), o tempo de cura é um fator que influencia diretamente no aumento da resistência do solo estabilizado, possibilitando que ocorra as reações pozzolânicas entre o cimento o solo e o PV. Com isso, foram definidos os tempos de

cura de 28 dias na etapa 1. Para a etapa 2 foram definidos os períodos de 28 e 90 dias de cura.

b) Das variáveis fixas:

**Tipo do solo:** solo fino sedimentar da Formação geológica de Guabirotuba, coletado em 22 de fevereiro de 2022. Foi escolhido para a coleta uma rua que apresentasse defeitos, de tráfego local (leve), pavimentada com tratamento superficial duplo (TSB), com mais de 40 anos. A base do pavimento é de saibro (10 cm) e o TSB apresentava cerca de 3 cm, o material foi coletado a uma profundidade de 40 cm;

**Tipo do cimento:** O cimento Portland CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, adquirida em loja de material de construção e replicando o mesmo material utilizado em campo;

**Tipo do vidro:** o resíduo do vidro foi fornecido por uma vidraçaria local.

**Velocidade de deformação dos ensaios de compressão simples:** 1,00 mm por minuto.

**Temperatura:** temperatura durante os ensaios fixa e igual a 23° C.

c) Das variáveis dependentes: Foram utilizadas as seguintes variáveis dependentes:

**Peso específico aparente máximo seco ( $p_{d,max}$ ) e Umidade ótima ( $W_{ot}$ ):** Obtido através da compactação;

**Limites de Atterberg;**

**Resistência à compressão simples ( $q_u$ );**

**Resistência à compressão diametral ( $q_t$ );**

O quadro 3 apresenta os ensaios do programa experimental realizado na pesquisa. Foram executados ensaios de caracterização para classificar o tipo de solo e as propriedades de compactação, para a determinação dos parâmetros das etapas seguintes. Nesta etapa, foram realizados os seguintes ensaios: teste de granulometria em solo, cimento e pó de vidro.

Com os parâmetros obtidos durante o ensaio de compactação, iniciou-se os ensaios de resistência compactação simples, a fim de determinar o efeito do cimento e do pó de vidro combinados sobre o solo.

**Quadro 3 - Ensaio realizados**

ENSAIOS		Solo	Cimento	Vidro	Mistura
	Granulometria	x	x	x	
	Limite de Liquidez (LL)	x			x
	Limite de Plasticidade (LP)	x			x
	Massa Específica Real dos Grãos (Gs)	x	x	x	x
	Compactação Normal (E.N)	x			x
	Compactação Intermediária (E.I)	x			x
	Compactação Modificada (E.M)	x			x
	Espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX)	x	x	x	
	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	x	x	x	x
Resistência a Compressão Simples ( $q_u$ )	Energia normal (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia intermediária (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia modificada (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia modificada (Cura: 90 dias)	x			x
Resistência a Compressão Diametral ( $q_t$ )	Energia normal (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia intermediária (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia modificada (Cura: 28 dias)	x			x
	Energia modificada (Cura: 90 dias)	x			x

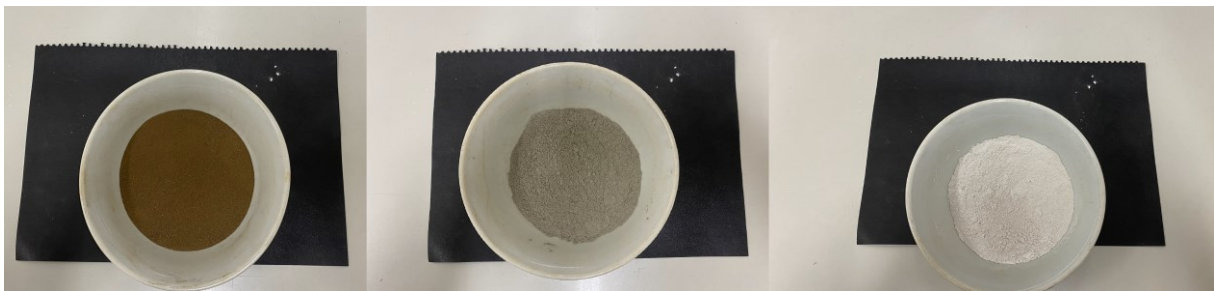
**Fonte: O autor (2023).**

Com os dados de resistência mecânica foi desenvolvida a análise dos resultados por processamento estatístico de dados e comparação com a literatura.

### 3.2 Materiais

Os materiais utilizados na presente pesquisa consistem em: solo, cimento e pó de vidro (figura 2). A combinação destes materiais tem por finalidade proporcionar o melhoramento das propriedades geotécnicas do solo da Formação Guabirota, e as misturas utilizadas neste trabalho estão representadas pela figura 3.

**Figura 2 - Materiais utilizados no estudo – Solo, cimento e pó de vidro**



**Fonte: O autor (2023).**

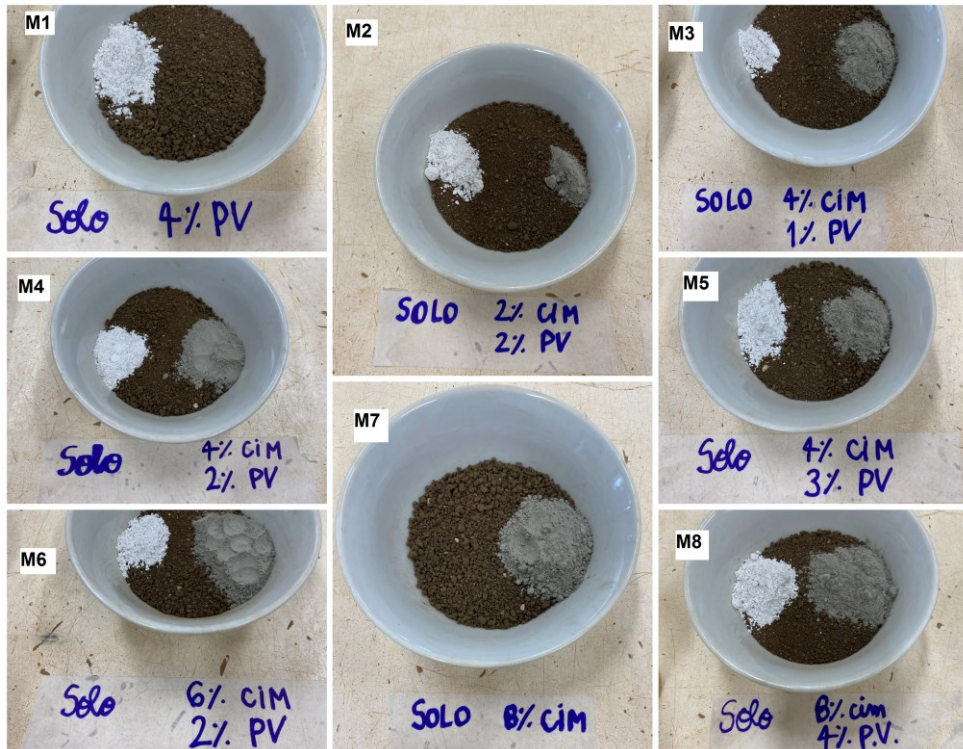
Ademais, foram adquiridos, coletados e preparados os materiais para realização dos ensaios no município de Curitiba – PR. O cimento foi adquirido em loja de construção local e o resíduo de vidro foi fornecido por uma vidraçaria local. O presente estudo utilizou o solo, a mistura com 4% de teor de cimento e a mistura com 4% de teor de cimento e 1% de teor de PV para a etapa 1, e variando em até 8% de cimento e em até 4% de pó de vidro para a etapa 2, conforme as misturas citadas em teores pelo quadro 4.

**Quadro 4 - Teor de cimento e pó de vidro das amostras**

Etapa	Amostra - misturas	Pó de vidro	Cimento
ETAPA 1	Solo puro	0%	0%
	Solo cimento 4%	0%	4%
	Solo cimento 4% - PV 1%	1%	4%
ETAPA 2	Solo puro	0%	0%
	M1	4%	0%
	M2	2%	2%
	M3	1%	4%
	M4	2%	4%
	M5	3%	4%
	M6	2%	6%
	M7	0%	8%
M8	4%	8%	

Fonte: O autor (2023).

**Figura 3 - Representação das misturas – M1 ao M8**



Fonte: O autor (2023).

### 3.2.1 Solo

O solo utilizado foi obtido no município de Curitiba, Paraná, situado no bairro Capão Raso, pertencendo a terceira camada da Formação Guabirotuba. O local possui coordenadas geográficas latitude  $25^{\circ} 30' 40.194''$  S e longitude  $49^{\circ} 18' 3.359''$  W, conforme ilustrado na Figura 4. O solo foi coletado no estado deformado, e apresentava no momento da extração características de solo com granulometria fina e cor marrom.

**Figura 4 - Localização e área de coleta**



Fonte: Google Earth (2022) e o Autor (2022).

### 3.2.2 Cimento

Para o presente estudo foi utilizada o CP II Z - Cimento Portland composto com pozolana. O cimento é utilizado para estabilização de solos e amplamente aplicada em pesquisas (BALDOVINO, 2018, 2021a; BORDIGNON, 2015). A obtenção do material foi em um distribuidor local na cidade de Curitiba, Paraná, e as embalagens foram armazenadas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ecoville, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Laboratório de Geotecnia, Sede

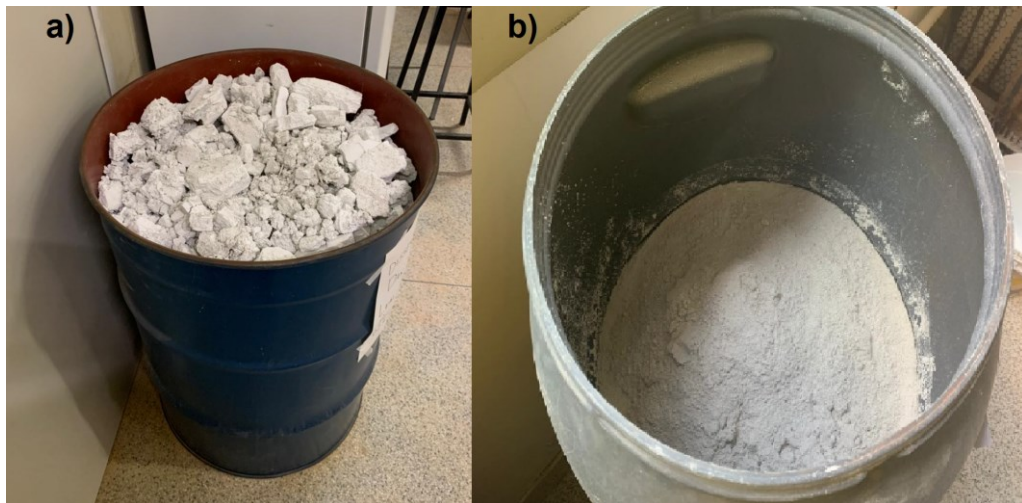


Ecoville. A marca Votoran e o tipo de cimento (pozolonânico) foi escolhido com base na escolha comum das empresas de pavimentação.

### 3.2.3 Vidro

O resíduo do vidro foi fornecido por uma vidraçaria localizada no bairro Boqueirão, Curitiba, Paraná. O resíduo utilizado é proveniente do tratamento da água necessária para lapidação e polimento do vidro plano. Ao ser coletado, o resíduo de vidro se encontrou em blocos de grandes dimensões, conforme mostrado na figura 5. Para utilização nos ensaios do presente estudo, o resíduo passou pelo processo de cominuição, onde foi utilizado o equipamento de abrasão tipo Los Angeles durante aproximadamente 8 horas.

**Figura 5 - Preparação do pó de Vidro (a) Resíduo de vidro; (b) Resíduo após a cominuição de 8 horas na abrasão Los Angeles.**



Fonte: O autor (2023).

## 3.3 Métodos

### 3.3.1 Preparação das amostras

A preparação do solo puro e das misturas seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 6457 (ABNT, 2016a), norma que orienta os procedimentos adequados para essas etapas. Inicialmente, os materiais foram submetidos à secagem em estufa a uma temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  até alcançarem a constância de peso desejada. Em

seguida, o solo foi destorroado, peneirado e armazenado em embalagens de plástico, a fim de preservar suas características.

Devido ao clima da região onde os ensaios foram realizados, foi necessário verificar a presença de umidade residual no solo. Essa verificação foi realizada nos ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e moldagens dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica.

### 3.3.2 Ensaios de Caracterização do Solo, Cimento, Vidro e mistura

Para a caracterização do solo, cimento, vidro e mistura, foram produzidos os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos (Gs) e análise química por meio da espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX). Para o solo e a mistura foram realizados os ensaios de limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e compactação para as três energias (normal, intermediária e modificada). O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado para o solo, cimento, pó de vidro e para as misturas.

### 3.3.3 Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria foi conduzido de acordo com as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2016b). No caso do solo proveniente da Formação Guabirotuba, que possui grãos muito finos, o processo de peneiramento foi complementado pela lavagem do material, devido à dificuldade de caracterização apenas através do peneiramento convencional.

Para analisar o solo que passa pela peneira nº200, ou seja, com partículas menores que 0,075 mm, conforme estabelecido na norma mencionada, utilizou-se o método de sedimentação. Entretanto, esse procedimento foi substituído pelo analisador de tamanho de partículas por difração a laser. O equipamento utilizado foi o Bettersize S3 Plus, localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ecoville, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Laboratório de caracterização de materiais, Sede Ecoville.

Esse equipamento é capaz de medir o tamanho das partículas variando de 0,01  $\mu\text{m}$  a 3500  $\mu\text{m}$ . O mesmo método foi aplicado tanto para o pó de vidro quanto para o cimento.

#### 3.3.4 Ensaio de massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos foi conduzida de acordo com o método estipulado pela Norma DNER-ME 093. Esse ensaio foi aplicado tanto para o solo, pó de vidro e cimento, quanto para as misturas destes materiais.

A Norma DNER-ME 093 estabelece as etapas e os métodos de preparação das amostras de solo, o processo de peneiramento, a determinação das frações granulométricas, além de fornecer orientações sobre os equipamentos e critérios de análise que foram utilizados na pesquisa.

Devido a problemas identificados em ensaios anteriores, optou-se por realizar o ensaio em quadruplicata. Essa expansão no número de amostras possibilitou a exclusão de dados discrepantes, garantindo a conformidade com a norma, que estabelece que as médias não devem variar mais do que 0,009. Essa abordagem contribui significativamente para a obtenção de resultados mais confiáveis e consistentes.

#### 3.3.5 Espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) são técnicas analíticas amplamente empregadas na caracterização de materiais.

Para a análise da composição elementar utilizando a técnica de FRX, a norma ABNT NBR ISO 12677:2017 estabelece diretrizes específicas. Essa norma define as condições de medição, os requisitos para calibração do equipamento, os métodos de preparação das amostras, bem como oferece orientações sobre a interpretação e relatório dos resultados obtidos. No presente estudo, a análise por FRX foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento Acadêmico de Construção Civil da UTFPR. Esse método visa obter análises quantitativas e

qualitativas por meio de parâmetros fundamentais determinados por energia dispersiva.

O MEV é uma ferramenta que possibilita a obtenção de imagens de alta resolução, permitindo a observação da estrutura de forma tridimensional. No presente estudo, o ensaio de MEV foi realizado para análise do solo e das misturas. O procedimento foi conduzido no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR, utilizando o equipamento Zeiss, modelo EVO MA 15. Essa técnica proporciona uma visualização detalhada da morfologia e características dos materiais investigados.

### 3.3.6 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg são parâmetros utilizados para determinar as propriedades de consistência e plasticidade dos solos. Esses limites incluem o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o índice de plasticidade.

As normas NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016) estabelecem os procedimentos padronizados para a determinação dos limites de liquidez, plasticidade e o cálculo do índice de plasticidade, que foram utilizados para a obtenção de resultados na pesquisa.

### 3.3.7 Ensaio de compactação

O ensaio foi realizado no laboratório de geotecnia da UTFPR. A partir dos resultados obtidos no ensaio de compactação, foram determinados os índices obtidos para a realização do trabalho incluíram a densidade máxima seca ( $\gamma_{dmax}$ ), a Umidade ótima ( $w_{opt}$ ).

### 3.3.8 Ensaios de Resistência Mecânica

Os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral são amplamente usados na engenharia geotécnica para determinar as propriedades mecânicas do solo, avaliando sua resistência à compressão. Ambos os ensaios foram

realizados no laboratório da UTFPR, utilizando a prensa Hidráulica Universal, marca Emic, modelo DL30000, capacidade de 300kN.

Durante esses ensaios, a energia elástica é armazenada no solo pela carga aplicada, enquanto a energia dissipada corresponde às perdas devido à deformação e resistência interna do solo. Além disso, existem diferentes níveis de energia utilizados nos ensaios de compactação para representar diferentes condições de campo, como a energia normal, intermediária e a modificada.

Na etapa 1 da pesquisa foram realizados ensaios em todas as energias, e na etapa 2 foram realizados ensaios apenas na energia modificada, buscando a aplicação para as misturas na pavimentação.

No Brasil, as normas ABNT NBR 6456 e ABNT NBR 12069 são referências utilizadas na realização dos ensaios de compressão simples e compressão diametral, respectivamente. O quadro 5 representa o planejamento experimental de amostras.

**Quadro 5 - Planejamento de amostras ensaiadas**

		ETAPA 1			ETAPA 2	
		T. Cura				
		28			28	90
		EN	EI	EM	EM	EM
Resistencia à Compressão Simples ( $q_u$ )	Solo	4	4	4	5	5
	Solo-cimento	4	4	4	5	5
	Misturas	4	4	4	35	35
Resistencia à tração por Compressão Diametral ( $q_d$ )	Solo	4	4	4	5	5
	Solo-cimento	4	4	4	5	5
	Misturas	4	4	4	35	35
CPs por Energia		24	24	24	90	90
CPs por Tempo de Cura		72			180	
Total		252				

Fonte: O autor (2023).

### 3.3.9 Ensaio de resistência à compressão simples

A norma ABNT NBR 12770 orientou o ensaio de compressão simples, no qual uma amostra de solo foi submetida a uma carga axial vertical aplicada gradualmente.

Para a condução do ensaio, foi necessário preparar a amostra de solo conforme as especificações da norma ABNT NBR 12770. Essa norma estabeleceu os

procedimentos adequados para a moldagem e a preparação das amostras, assegurando a consistência dos resultados.

Uma vez que a amostra foi preparada, ela foi inserida na Prensa Hidráulica Universal, modelo DL30000. A carga foi aplicada de forma unidirecional, comprimindo a amostra entre duas placas de apoio. Durante o ensaio, foram registradas a deformação axial e a carga aplicada. A figura 6 registrou o momento da realização do ensaio. Após a análise estatística dos dados coletados, alguns conjuntos de dados de amostras foram excluídos devido à sua discrepância em relação às demais amostras.

**Figura 6 - Ensaio de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral**



Fonte: O autor (2023).

### 3.4 Análise estatística

#### 3.4.1 Determinação da Amostra Mínima

A amostra mínima a ser ensaiada, a fim de garantir estatisticamente a distribuição e confiabilidade dos resultados, dentro de um nível de confiança de 95%, foi determinada pela equação 1:

**Equação 1**

$$n = z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{Er^2}$$

n: número de repetições;

Er: erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

CV: coeficiente de variação da amostra;

$z_{\alpha/2}$ : valor tabelado que, para  $\alpha = 5\%$  de significância possui o valor de 1,96.

Assumindo como viável um coeficiente de variação da amostra de 10%, tem-se  $n = 3,84$  ou seja, com no mínimo 4 exemplares é possível obter respostas a um nível estatístico de confiança de 95%. Para a etapa 1 foram utilizadas 4 amostras por dado, e a para a etapa 2 foram utilizadas 5 amostras por dado, aumentando o nível de confiabilidade. (MOLIN et al, 2005)

### 3.4.2 Análise de Dados Espúrios (Outliers)

Para a detecção de outliers em uma amostra de comportamento normal, foram eliminados dados espúrios (outliers) de maneira racional, adotando-se o critério de Peirce. O critério seguiu o princípio de que as observações deveriam ser rejeitadas no momento em que os desvios reais da média, obtidos por mantê-los, fossem menores do que os desvios obtidos por sua rejeição, multiplicados pela probabilidade de realizar tantas e não mais observações normais.

O objetivo dessa técnica era gerar probabilidades de erro que ocorressem no sistema onde todas as  $n$  observações fossem mantidas versus as  $k$  amostras rejeitadas. Em seguida, foram rejeitadas  $k$  observações e verificado se a amostra se tornava mais próxima da normal em relação à situação anterior.

O critério de Peirce foi matematicamente complexo de aplicar; portanto, Gould modificou o método, criando tabelas derivadas das equações de Peirce, tornando-o mais simplificado (ROSS, 2004).

Na Tabela 1, foram apresentados os resultados obtidos pelo critério de Peirce (R) para 10 amostras, sendo que, dentre elas, no máximo 5 foram consideradas duvidosas.

De acordo com o quadro 6, R representou a razão do máximo desvio permitido de um resultado em relação à média, dividido pelo desvio padrão da amostra, conforme apresentado na Equação 2:

Equação 2

$$R = \frac{|x_i - x_m|_{max}}{\sigma}$$

$x_i$  = valor de cada resultado individual;  
 $x_m$  = média das amostras;  
 $\sigma$  = desvio padrão.

**Quadro 6 - Valores de R (Pierce)**

n	Observações Duvidosas				
	1	2	3	4	5
3	1,196				
4	1,383	1,078			
5	1,509	1,2			
6	1,61	1,299	1,099		
7	1,693	1,382	1,187	1,022	
8	1,763	1,453	1,261	1,109	
9	1,824	1,515	1,324	1,178	1,045
10	1,878	1,57	1,38	1,237	1,114

Fonte: ROSS, S.M. (2004).

Para determinar se os elementos deveriam ser rejeitados, foi necessário seguir uma metodologia que envolveu os seguintes passos: calcular a média e o desvio padrão dos conjuntos de dados; obter o valor de R na Tabela de Pierce com base no número de medições realizadas; calcular o máximo desvio permitido  $|x_i - x_m|_{max}$  para todos os dados suspeitos e eliminar as medições suspeitas se  $|x_i - x_m|$  fosse maior que  $|x_i - x_m|_{max}$ .

Se uma medida fosse rejeitada, assumiria o caso de duas observações duvidosas, mantendo os valores originais da média, desvio padrão e número original de medições. No caso de mais de um elemento rejeitado, assumiu-se o próximo maior valor das observações duvidosas, preservando os valores originais de média, desvio padrão e número original de medições. Os cálculos foram refeitos aumentando gradualmente o número de possibilidades de medições duvidosas até que não



houvesse mais elementos a serem eliminados. Por fim, com os dados restantes, calculou-se a nova média e desvio padrão da amostra.

### 3.4.3 Teste de Hipóteses

Testes de hipóteses corresponderam a procedimentos estatísticos que se basearam na análise de uma amostra a partir da teoria de probabilidades e que buscaram avaliar parâmetros desconhecidos de uma população. Assim, foram formuladas duas hipóteses:

- Hipótese nula (H<sub>0</sub>): hipótese que representou a ausência do efeito que se desejava verificar;
- Hipótese alternativa (H<sub>1</sub>): hipótese que o investigador desejou verificar (efeito do tratamento).

### 3.4.4 Análise de Variância – Anova

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 no quadro 7.

**Quadro 7 - 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	$\sum(Y - Y_{est})^2$	$(n - k - 1)$	$\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$	$\frac{\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k}}{\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}}$
Total	$\sum(Y - Y_{med})^2$	$(n - 1)$		

**Fonte: Adaptado de Gaudio e Zandonade (2001) .**

### 3.4.5 Valor-p

O Valor-p foi a probabilidade de se obter uma estatística do teste (por exemplo, o valor da função F da Anova) que fosse igual ou mais extrema que a estatística encontrada na amostra observada, sob a suposição de que a hipótese nula era verdadeira. Então:

- Se o valor-p foi menor que o nível de significância  $\alpha$ , rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ );
- Se o valor-p foi maior que o nível de significância  $\alpha$ , não rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ ).

Neste trabalho, para a determinação da Análise de Variância, foi utilizado o software Statgraphics® Centurion XVI foi utilizado. Uma vez que as variâncias apresentaram diferenças significativas, foi determinado quais grupos de médias, em particular, eram importantes. Para essa análise, o procedimento denominado Multiple Range Test, através do teste de Tukey-Kramer, foi utilizado, mediante o uso do mesmo software.

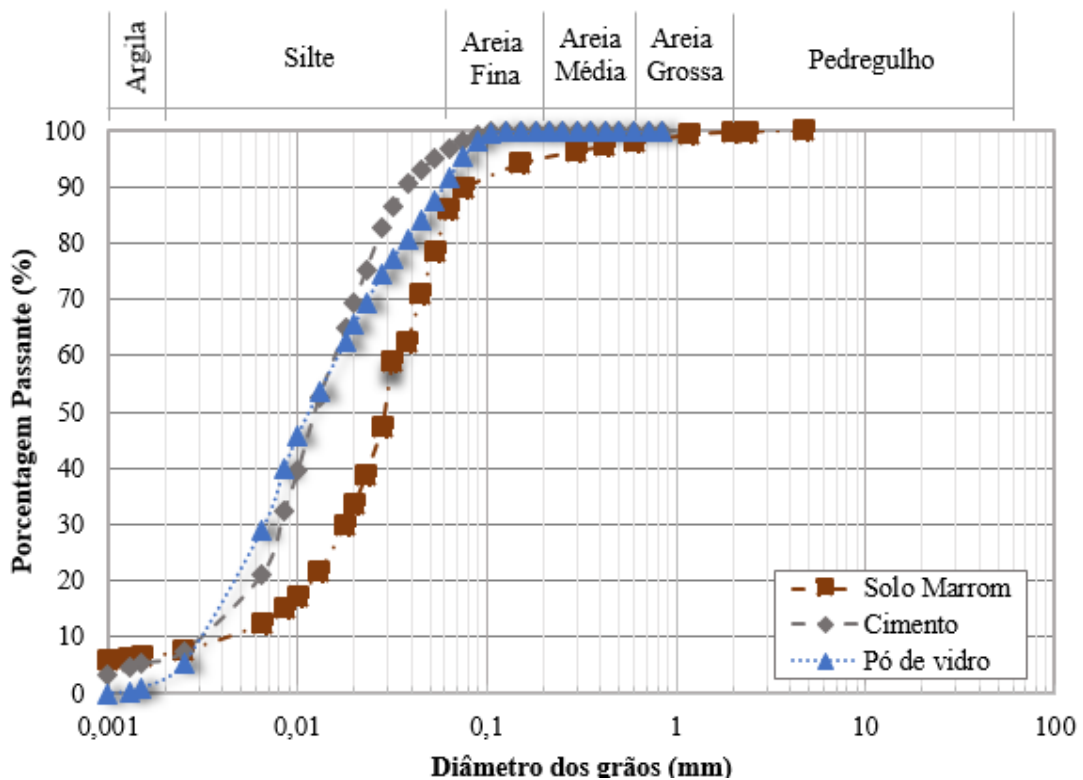
A determinação dos modelos estatísticos foi obtida através de Análise Multivariada, tipo regressão múltipla, considerando o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado. Para essas determinações, o software Infer32 foi empregado.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do solo, cimento, pó de vidro e misturas

A análise granulométrica do solo consistiu em duas fases distintas. A primeira fase envolveu o peneiramento utilizando o método de lavagem do solo, enquanto a segunda fase foi realizada com o auxílio de um granulômetro a laser. Antes de iniciar o procedimento de lavagem, foi coletado o material que passou pela peneira #200 (0,075mm). Posteriormente, esse material foi submetido ao granulômetro juntamente com o cimento e o pó de vidro. A representação da distribuição granulométrica dos materiais é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Curva granulométrica do solo, cimento e PV



Fonte: O autor (2023).

Através da análise granulométrica, determinaram-se os diâmetros correspondentes às porcentagens de 10%, 30%, 50%, 60% e 90% das partículas passantes no solo. Com base nesses dados, foi possível calcular os coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) e de curvatura ( $C_c$ ).

A determinação da densidade real (Gs) dos materiais foi conduzida de acordo com a norma DNER-ME 093 (1994). Conforme indicado no quadro 8, os valores de Gs foram: 2,16 para o solo, 3,11 para o cimento e 2,327 para o PV.

**Quadro 8 - Granulometria das amostras**

Propriedades	Solo	Cimento	Vidro	Normas
Densidade Real dos Grãos (GS)	2,165	3,113	2,327	DNER-ME 093 NBR NM 23
Propriedades	Solo	Cimento	Vidro	Normas
<b>Granulometria</b>				
Areia Grossa (2 - 0,6 mm) (%)	2,03	--	--	NBR 6502
Areia Média (0,6 - 0,2 mm) (%)	3,75	--	--	
Areia Fina (0,2 - 0,06 mm) (%)	8,15	3,18	11,02	
Silte (0,06 - 0,002 mm) (%)	56,15	27,39	44,82	
Argila (< 0,002 mm) (%)	29,89	69,43	44,16	
Diâmetro Efetivo (D10) (mm)	0,00478	0,00026	0,005	--
D30 (mm)	0,01515	0,00418	0,0105	--
D50 (mm)	0,02954	0,01204	0,0231	--
D60 (mm)	0,04903	0,02282	0,043	--
D90 (mm)	0,071	0,03725	0,0648	--
Coeficiente de Uniformidade (Cu)	10,253	86,768	8,609	--
Coeficiente de Curvatura (Cc)	0,979	2,915	0,515	--

Fonte: O autor (2023).

O gráfico do ensaio de limite de liquidez (LL) obteve umidade obtida no 25° golpe de 40,12%, enquanto o valor do limite de plasticidade (LP) foi de 31,60%. Com esses dados, calculou-se o índice de plasticidade (IP), resultando em 8,52%.

Os parâmetros do índice de consistência foram empregados na construção de um gráfico na Carta de Plasticidade de Casagrande. A classificação do solo com base nas diretrizes da SUCS (ASTM, 2017) e na Carta de Plasticidade, resultou na categorização como solo siltoso de baixa compressibilidade (ML). Seguindo a classificação rodoviária HRB (ASTM, 1993), o solo também foi identificado como pertencente ao subgrupo A4, caracterizado como material típico silte não plástico ou moderadamente plástico, com uma média de 75% das partículas passando pela peneira 200.

Mediante o emprego da técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX), obteve-se a caracterização química precisa do solo, cimento e pó de vidro, conforme ilustrado no quadro 9.

**Quadro 9 - Composição química das amostras**

	<b>SOLO</b>	<b>CIMENTO</b>	<b>PÓ DE VIDRO</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	58,24%	12,52%	88,93%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	32,25%	2,01%	7,70%
<b>SO<sub>3</sub></b>	4,50%	8,44%	2,85%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,12%	1,80%	-
<b>CaO</b>	0,80%	74,85%	0,59%
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,28%	-	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,25%	0,32%	-

Fonte: O autor (2023).

No solo, os compostos químicos preponderantes identificados foram o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), comumente designado como sílica, e o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), denominado alumina. Estes resultados são coerentes com estudos anteriores realizados por Pudell (2022) que também identificou a sílica e alumina como os principais constituintes do solo da região da Formação Guabirotuba. (49,065% de SiO<sub>2</sub> e 41,067% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Relativamente ao cimento, os constituintes químicos predominantes identificados foram o óxido de cálcio (CaO) e a sílica (SiO<sub>2</sub>). Esta composição química está em consonância com os resultados de Muñoz (2021), que também observaram o óxido de cálcio e a sílica como os principais componentes de cimentos (57,74% CaO e 26,38%SiO<sub>2</sub>).

Em relação ao pó de vidro (PV), observou-se uma predominância de sílica, com uma concentração reduzida de óxido de cálcio, refletindo sua composição sodocálcica. Pudell (2018) obteve resultados similares ao estudar a composição do pó de vidro reciclado, corroborando os dados presentes neste estudo. (SiO<sub>2</sub>-76,521%)

Esses compostos são essenciais nas reações pozolânicas que levam à síntese do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratado (C-A-H). Conforme apontado por Consoli et al (2016) e Baldovino (2021), tais compostos podem exibir propriedades cimentantes que contribuem para amplificar a resistência mecânica e química da composição.

Em resumo, as misturas de solo natural, solo com 4% de cimento e solo com 4% de cimento e 1% de pó de vidro são plásticas, mas a adição de cimento e pó de vidro reduz a faixa de umidade em que elas são moldáveis (índice de plasticidade menor). A classificação SUCS e HRB indica que todas as misturas têm características

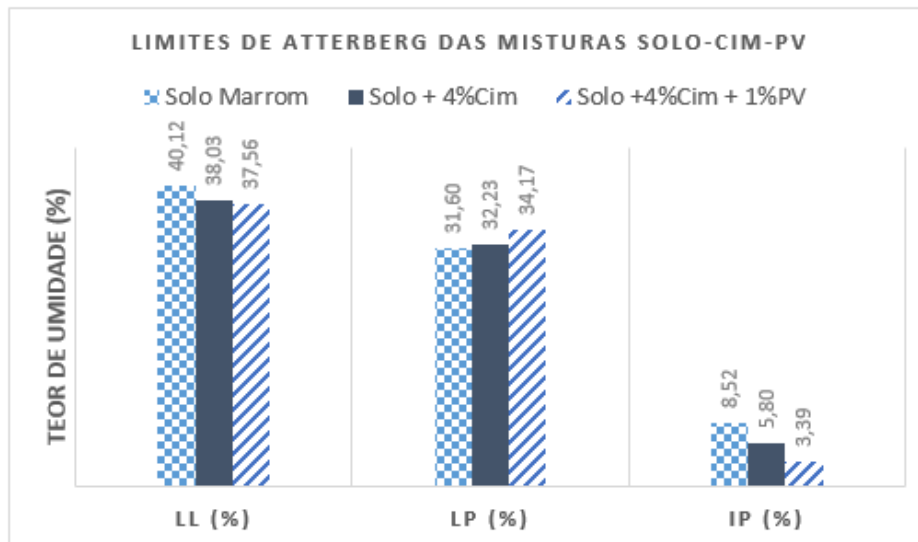
de baixa plasticidade. As propriedades físicas, como gravidade específica e índice de vazios, não são afetadas significativamente pelas adições de cimento e pó de vidro. Os limites de Atterberg estão representados no quadro 10 e representadas graficamente pela figura 8.

**Quadro 10 - limites de Atterberg e classificação do solo**

Misturas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classificação			Gs
				SUCS	HRB	IG	
Solo	40,11	31,6	8,51	ML	A5/A4	8,5	2,17
Solo + 4%cim	38,12	32,23	5,89	ML	A4	8,4	2,21
Solo + 4%cim + 1%PV	37,55	34,16	3,39	ML	A4	8,2	2,23

Fonte: O autor (2023).

**Figura 8 - limites de Atterberg**

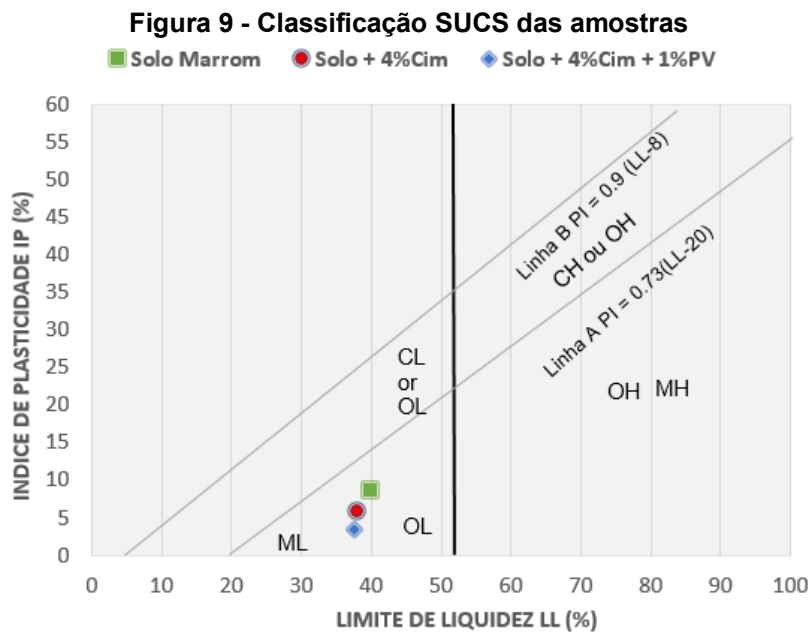


Fonte: O autor (2023).

Com os parâmetros de índice de plasticidade e limite de liquidez, foi possível inseri-los na Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 9) com objetivo de analisar o impacto da adição do cimento e PV no solo. Nota-se que com o incremento de cimento e pó de vidro, os pontos se distanciam da linha central que separa o gráfico conforme a propriedade de alta ou baixa compressibilidade, cada vez com menor compressibilidade. O solo natural ficou no limite entre a classificação de solos A-5 e A-4, solos siltosos de alta e baixa compressibilidade, respectivamente. Esse comportamento em que o solo pode mudar o comportamento de alta compressibilidade (MH) para baixa compressibilidade (ML) foi citado por Vizcarra (2010) e também foi observado por Baldovino (2018).

Nos ensaios do solo, o Limite Líquido (LL) indicou um teor de umidade de 40,11%. A classificação SUCS atribuiu à mistura o código "ML", caracterizando-a como solo de baixa plasticidade. A classificação HRB classificou a mistura como "A5/A4", indicando sua baixa plasticidade e comportamento específico em relação à compactação. O Índice de Vazios (IG) foi determinado como 8,5, relacionado à compactidade da mistura.

Nos ensaios de solo cimento, o LL foi obtido como 38,12%, mostrando um teor de umidade ligeiramente inferior em comparação ao solo puro. O LP resultou em 32,23%, o que indica que a adição de 4% de cimento tornou o solo um pouco mais plástico. O IP foi calculado como 5,89% e representa uma faixa de umidade mais estreita em relação à mistura anterior. A classificação SUCS manteve-se como "ML", indicando que a adição de cimento não alterou a plasticidade do solo significativamente.



Fonte: O autor (2023).

A classificação HRB foi atualizada para A4 - solos siltosos e argilosos. O Índice de Vazios (IG) apresentou o valor de 8,4, sugerindo que a compactidade da mistura permaneceu próxima ao solo original. A Gravidade Específica (GS) do solo com 4% de cimento foi medida como 2,21, ou seja, indicando que a adição de cimento não alterou significativamente a densidade relativa.

Em resumo, a adição de cimento e pó de vidro às misturas de solo mostrou influência nos limites de Atterberg e no índice de plasticidade, o que tornou as misturas

mais plásticas e com faixas de umidade mais estreitas. A classificação SUCS permaneceu como "ML" em todas as misturas, indicando baixa plasticidade. A compactidade e densidade relativa das misturas não foram significativamente afetadas pelas adições de cimento e pó de vidro.

A adição de cimento e pó de vidro provocou, em geral, uma diminuição no índice de plasticidade (IP). Segundo Harichane, Ghrici e Kenai (2009) a diminuição do IP provoca melhoria na trabalhabilidade do solo ou em outras palavras, a modificação das características de plasticidade dos solos causadas pela adição de pozolanas provavelmente tornará esse solo adequado para a maioria das operações de construção, mesmo sob condições ambientais severas, como a chuva. O índice de plasticidade diminui com a tendência de que o limite de liquidez tende a diminuir, ao passo que o limite de plasticidade aumenta.

#### **4.2 Ensaios de compactação**

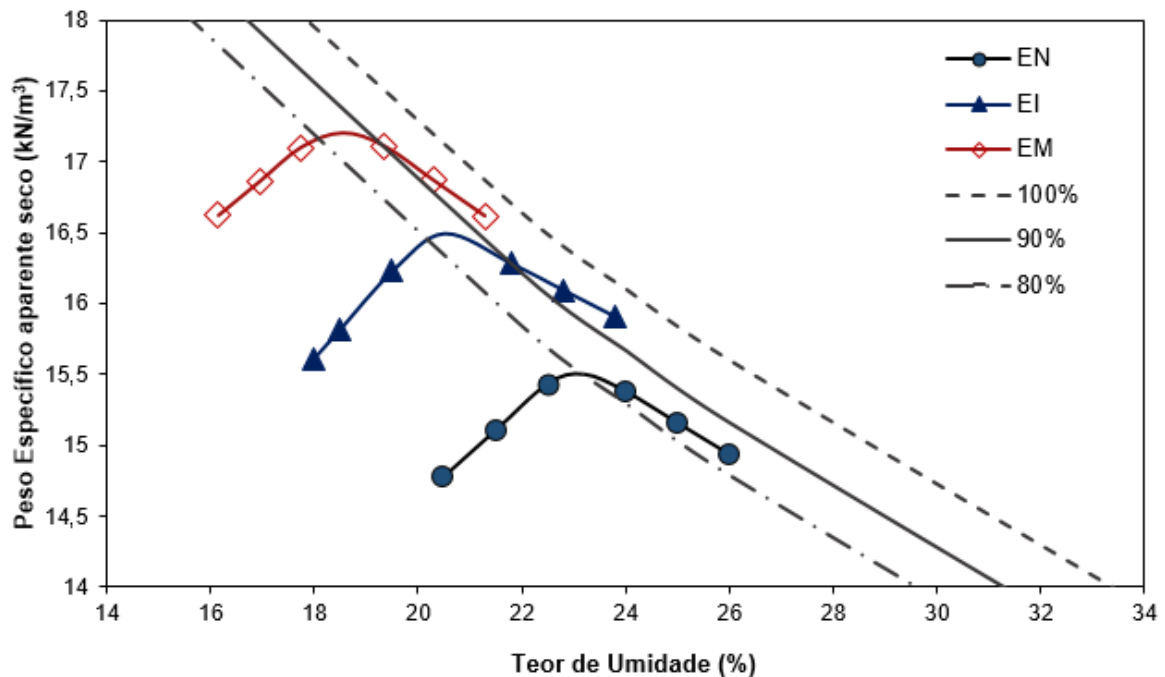
O ensaio de compactação tem por finalidade identificar os parâmetros de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d,max}$ ) e teor de umidade ótimo ( $W_{ot}$ ), para moldagem dos corpos-de-prova (CPs) utilizados para a determinação das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral. Os ensaios foram realizados para o solo puro e as misturas, na energia normal, intermediária e modificada. Na Figura 10 são apresentadas as curvas de compactação do solo nas energias normal, intermediária e modificada.

Em comparação aos parâmetros obtidos no solo puro para todas as energias de compactação, quando adicionado teores de cimento e pó de vidro houve uma tendência na modificação nos parâmetros de peso específico seco e umidade ótima. Em estudos com solos estabilizados com cimento, os resultados apresentaram a característica de redução do peso específico seco e aumento no teor de umidade ótima com a adição de teores do cimento (CONSOLI et al, 2016). Porém, Ibrahim, Mawlood e Alshkane (2019) observaram um aumento na umidade ótima com a adição de pó de vidro em um solo argiloso e isso pode justificar a redução da umidade de forma discreta. O aumento do peso específico seco e a redução da umidade pode ser justificada devido ao aumento da energia de compactação. Quando a energia de compactação é aumentada, as partículas do material são pressionadas mais firmemente umas contra as outras, resultando em uma maior densidade do material seco. Há uma maior quantidade de massa sólida por unidade de volume, o que se



traduz em um peso específico seco maior. Além disso, o aumento da energia de compactação também pode influenciar a quantidade de umidade presente no material. Segundo o autor, isso ocorre porque a maior pressão exercida durante a compactação pode expulsar parte da umidade presente nos espaços entre as partículas do material, sendo comum observar uma redução na umidade do material quando a energia de compactação é aumentada. (PINTO, 2016).

**Figura 10 - Curvas de compactação**



Fonte: O autor (2023).

No quadro 8 estão dispostos os resultados do ensaio de compactação na energia normal, intermediária e modificada, para o solo puro e as misturas de solo-cimento-PV.

Para as curvas na energia normal foi possível observar uma discreta variação na umidade ótima, peso específico seco e achatamento da curva. Para as misturas com teor de cimento e pó de vidro, foi observado uma diminuição de aproximadamente 0,65%  $\gamma_{d,max}$  em relação ao solo e um aumento de 2,8% na  $W_{ot}$ .

Nas curvas da energia intermediária, o comportamento das curvas foi semelhante à energia normal. A variação dos parâmetros entre o solo natural e o solo cimento-PV foi menor que a energia analisada anteriormente, com apenas 0,5% para o  $\gamma_{d,max}$  e 1,3% de  $W_{ot}$ .

Por fim, para as curvas de energia modificada, observa-se a mesma tendência da energia intermediária. O menor  $\gamma_{d,max}$  foi identificado no solo cimento-PV, sendo de 16,7 kN/m<sup>3</sup> e foi obtido o maior acréscimo de umidade, totalizando 19,7%.

**Quadro 11 - Umidade ótima (U) e Peso específico seco máximo ( $\gamma_{d,max}$ )**

SOLO NATURAL					
NORMAL		INTERMEDIÁRIA		MODIFICADA	
U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )
23,2	15,5	20,5	16,5	18,55	17,2
SOLO 4% CIMENTO					
NORMAL		INTERMEDIÁRIA		MODIFICADA	
U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )
24,7	15,1	21,7	16,15	19,4	17,12
SOLO 4% CIMENTO + 1%PV					
NORMAL		INTERMEDIÁRIA		MODIFICADA	
U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )	U (%)	Yd (kN/m <sup>3</sup> )
26	14,85	21,8	16	19,7	16,7

Fonte: O autor (2023).

Em comparação às três amostras, foi possível observar que a adição de cimento e pó de vidro tende a reduzir a densidade seca em todas as energias de compactação e teores de umidade. Para todas as amostras, o peso específico seco (Yd) aumenta à medida que a energia de compactação aumenta, mantendo o mesmo teor de umidade. Isso indica que quanto maior a energia de compactação aplicada, maior será a densidade alcançada no solo.

Estudos anteriores focados na estabilização dos parâmetros do solo proveniente da formação Guabirota também empregaram estabilizadores químicos, tais como cimento, cal, pó de vidro e cinza de casca de arroz. Os resultados derivados desses ensaios estão em consonância com a literatura, evidenciando uma tendência de declínio na densidade seca, concomitantemente a um aumento na umidade ótima, conforme ilustrado no Quadro 12.

**Quadro 12 - Comparativo de parâmetros com pesquisas semelhantes**

Autor	Tipo de solo local / Classificação (SUCS)	Cim (%)	PV (%)	Outros Materiais (%)	Y <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)
Muñoz (2021)	Solo amarelo / MH	-	-	-	13,72	25,9
		5	-	15% - CCA	12,90	33,1
Baldovino (2021)	Solo amarelo / MH	-	-	-	13,80	28,0
	Solo amarelo / ML	-	-	7% Cal	13,51	31,5
Pudell (2022)	Solo vermelho / MH	-	-	-	15,31	23,2
	Solo vermelho / ML	-	2	10% - Cal	14,85	25,2
Presente pesquisa (2023)	Solo marrom / ML	-	-	-	17,20	18,6
		4	-	-	17,12	19,4
		4	1	-	16,70	19,7

Fonte: O autor (2023).

### 4.3 Ensaios de resistência mecânica – Etapa 1

Os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram realizados em três tipos de misturas diferentes: solo natural, solo com 4% de cimento e solo com 4% de cimento e 1% de pó de vidro, com tempo de cura de 28 dias. Os valores obtidos do ensaio de compressão simples estão representados pelo quadro 13 e graficamente pela figura 11 .

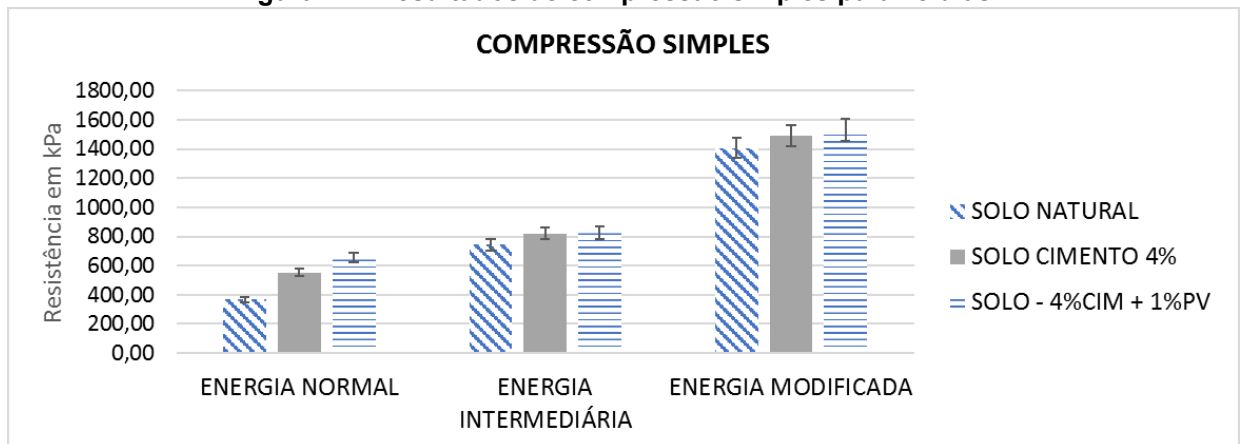
Para o solo natural, a resistência mecânica à compressão simples aumenta conforme a energia aplicada no ensaio aumenta, ou seja, a média de resistência é maior para a energia modificada em comparação à energia intermediária e normal. Para a energia normal a média foi de 366,94kPa e o maior valor foi na energia modificada de 1406,980kPa.

**Quadro 13 - Resultados de compressão simples para 28 dias**

ETAPA 1 - COMPRESSÃO SIMPLES - 28 DIAS - (kPa)			
	SOLO NATURAL	SOLO CIMENTO 4%	SOLO - 4%CIM + 1%PV
ENERGIA NORMAL	366,95	553,82	658,41
ENERGIA INTERMEDIÁRIA	742,70	819,92	825,98
ENERGIA MODIFICADA	1406,98	1491,71	1532,89

Fonte: O autor (2023).

**Figura 11 - Resultados de compressão simples para 28 dias**



Fonte: O autor (2023).

A partir dos dados obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples após 28 dias, constatou-se uma tendência de aumento na resistência mecânica do solo com a incorporação de aditivos.

O cimento, quando adicionado ao solo natural, demonstrou um aumento expressivo na resistência à compressão, especialmente em energias de classificação normal. O incremento foi de 50,8%, sendo este o maior aumento percentual observado em todas as categorias.

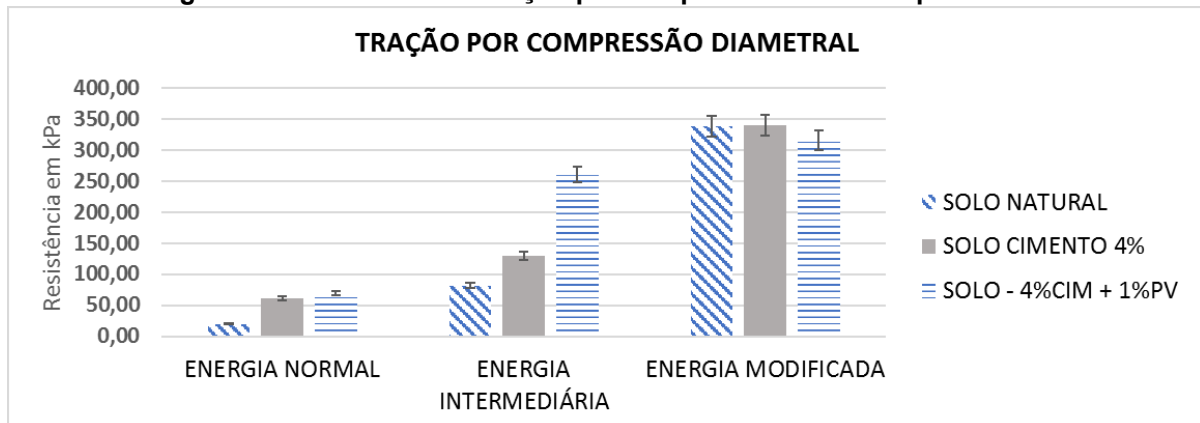
No entanto, ao adicionar 1% de pó de vidro ao solo já contendo 4% de cimento, o acréscimo na resistência foi menos pronunciado, com o maior aumento observado novamente na energia normal (18,9%). Nas outras categorias, a inclusão do pó de vidro proporcionou incrementos mais modestos (menores que 3%).

Em conclusão, a adição de cimento ao solo resulta em melhorias na sua resistência mecânica. O pó de vidro, embora proporcione aumentos adicionais, tem um impacto percentualmente menor, especialmente nas categorias de energia intermediária e modificada. A compressão simples mostrou aumentos mais moderados comparados à tração por compressão diametral, indicando que a adição de cimento e pó de vidro teve um impacto mais expressivo na resistência à tração.

**Quadro 14 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 dias**

ETAPA 1 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - (kPa)			
	SOLO NATURAL	SOLO CIMENTO 4%	SOLO - 4%CIM + 1%PV
ENERGIA NORMAL	19,93	61,06	69,81
ENERGIA INTERMEDIÁRIA	81,54	129,73	260,68
ENERGIA MODIFICADA	338,07	340,65	315,45

Fonte: O autor (2023).

**Figura 12 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 dias**

Fonte: O autor (2023).

Nos ensaios de tração por compressão diametral, observou-se que a amostra de solo puro apresentou o menor valor de resistência, 19,93 kPa, sob a condição de energia normal. Em contraste, o solo melhorado com 4% de cimento exibiu a maior resistência, alcançando 340 kPa na energia modificada. Os valores obtidos do ensaio de compressão simples estão representados pelo quadro 14 e graficamente pela figura 12 .

A adição de 4% de cimento ao solo propiciou um incremento substancial na resistência, especialmente sob a energia normal, com um acréscimo de 206,3%. Esse aumento percentual foi o mais proeminente dentre todas as categorias analisadas.

Quando 1% de pó de vidro foi incorporado ao composto já contendo 4% de cimento, notou-se uma amplificação na resistência, com destaque para a energia intermediária, na qual o aumento foi de 100,8%. Contudo, sob a condição de energia modificada, houve uma diminuição de 7,4% na resistência. Esta redução, desviando da expectativa inicial de amplificação com aditivos adicionais, pode ser atribuída a diversos fatores, entre eles: a homogeneidade da amostra, o processo de hidratação, a possível saturação de aditivos e variações na densidade e compactação, conforme discutido por SILVA et al. (2018).

#### 4.4 Ensaio de compressão simples – Etapa 2

Para a 2ª etapa foram realizados ensaios de compressão simples para o solo natural e as misturas M1 ao M8, totalizando 9 combinações de misturas, fixados na energia modificada e com Wot de 18,55% e o  $\gamma_{d,max}$  de 17,2 kN/m<sup>3</sup>. A comparação de Médias para o teste de Tukey-Kramer para 95 % de nível de confiança gerou o quadro 15. Pelo teste de comparação de médias de Tukey-Kramer, existem diferenças estatísticas significativas entre as médias que apresentam letras diferentes a um nível de confiança de 95%:

**Quadro 15 - Resultados de compressão simples para 28 e 90 dias**

ETAPA 2 - COMPRESSÃO SIMPLES - (kPa)				
	28 DIAS		90 DIAS	
SOLO	1834,0	E	4157,2	D
M1	5490,3	BA	4594,9	DC
M2	3183,2	D	4926,4	DCB
M3	2974,8	D	5033,6	DCB
M4	3591,6	DC	5665,5	CBA
M5	4533,8	CB	6227,8	BA
M6	5688,6	A	6404,1	BA
M7	3773,1	DC	6856,4	A
M8	4764,8	BA	4319,4	DC

Fonte: O autor (2023).

No solo puro, os valores de resistência à compressão aos 28 dias são os mais baixos entre as amostras testadas. Há um aumento na resistência do solo puro após 90 dias de cura, mas não é o mais alto valor observado entre as amostras.

O maior valor aferido entre as resistências das amostras aos 28 dias foi a amostra M6 (com 2% de pó de vidro e 6% de cimento), apresentando a maior resistência com 5688,6 kPa. Aos 90 dias foi a amostra M7 (com 0% de pó de vidro e 8% de cimento) com 6856,4 kPa.

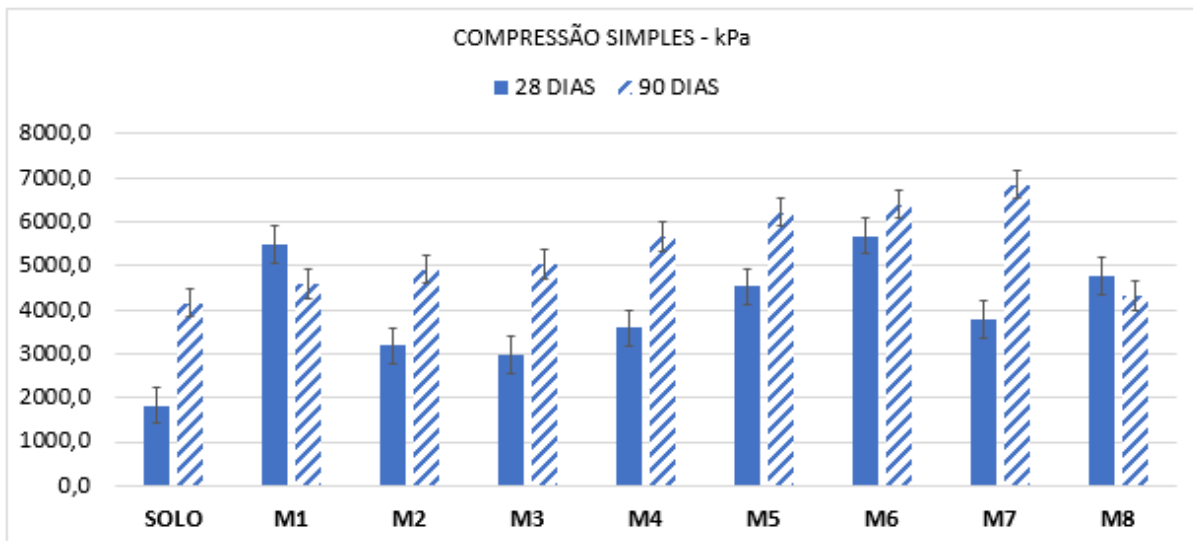
Quanto às amostras com menor desempenho, aos 28 dias o solo puro apresenta a menor resistência com 1834,0 kPa. Aos 90 dias o solo puro apresenta a menor resistência com 4157,2 kPa. Os menores valores correspondem às amostras sem aditivos era esperados, segundo a literatura, porém aos 90 dias a amostra M8 que possui os maiores teores de cimento e pó de vidro, apresentou o valor 4319,4 kPa

considerado baixo, já que mesmo com a maior adição total de aditivos, a resistência foi mais baixa que em teores menores de estabilizantes.

As amostras com pó de vidro, mas sem cimento (como M1) apresentaram um aumento na resistência em relação ao solo puro aos 28 dias, mas esse aumento não foi mantido aos 90 dias. A adição de cimento teve um impacto positivo mais consistente na resistência ao longo do tempo, visto que as amostras com maiores quantidades de cimento (como M6 e M7) apresentaram as maiores resistências após 90 dias.

A resistência do solo aumentou com o tempo, independentemente da adição de pó de vidro ou cimento, mas a presença destes aditivos influenciou a magnitude desse incremento. As amostras M6 e M7, com maiores concentrações de cimento, foram as mais consistentes em termos de aumento de resistência após um longo período de cura.

**Quadro 16 - Resultados de compressão simples para 28 e 90 dias**



Fonte: O autor (2023).

#### 4.5 Análise estatística dos ensaios de compressão simples – Etapa 2

Na pesquisa foi realizada uma análise dos dados de resistência à compressão, considerando a retração linear. No tratamento dos dados, adotou-se o critério de Peirce para identificar e eliminar outliers.

Com a utilização do software Infer32 para análise multivariada foi possível obter o modelo da Regressão para 28 dias, conforme a equação 3, e o modelo de regressão para 90 dias conforme a equação 4:

### Equação 3

$$RC_{28D} \text{ (kPa)} = 1804,2 + 230,18 \times [\text{Cimento (\%)}] + 491,89 \times [\text{PV(\%)}]$$

#### 4.5.1 Correlação do Modelo para compressão simples aos 28 dias de cura

Ao analisar a correlação, observou-se um coeficiente (R) de 0,9598. O valor t alcançado foi de 16,40, superando consideravelmente o valor t tabelado (ou t crítico) de 2,807, estabelecido para um nível de significância de 1,00%. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,9212 e o coeficiente  $R^2$  ajustado foi de 0,9144. Com base nesses resultados, categorizou-se a correlação como fortíssima.

#### 4.5.2 Análise da Variância do Modelo para compressão simples aos 28 dias de cura

Os resultados da análise de variância foram os seguintes:

- Regressão: Soma dos Quadrados =  $2,584 \times 10^7$ , GL = 2, Quadrados Médios =  $1,292 \times 10^7$  e Função F = 134,5.
- Residual: Soma dos Quadrados =  $2,209 \times 10^6$ , GL = 23 e Quadrados Médios =  $9,608 \times 10^4$ .
- Total: Soma dos Quadrados =  $2,805 \times 10^7$ , GL = 25 e Quadrados Médios =  $1,122 \times 10^6$ .

O valor F calculado foi de 134,5, ultrapassando consideravelmente o F tabelado de 5,664, estabelecido para um nível de significância de 1,000%. A significância do modelo atingiu um valor ínfimo de  $2,0 \times 10^{-11}\%$ , e a confiabilidade do modelo superou os 99,999%. Diante desses achados, aceita-se a hipótese de existência da regressão.

#### 4.5.3 Correlações Parciais em Relação à Variável Dependente para compressão simples aos 28 dias de cura

As correlações parciais observadas foram:

- RC (kPa): 1,0000
- Cimento (%): 0,7478
- Pó de Vidro (%): 0,7616



Pelos coeficientes obtidos, aceita-se a hipótese de que  $\beta$  é distinto de zero.

#### 4.5.4 Teste de Kolmogorov-Smirnov para compressão simples aos 28 dias de cura

Para este teste, a maior diferença observada foi de 0,106, enquanto o valor crítico determinado foi de 0,3224, considerando um nível de significância de 1%. De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov, aceita-se a hipótese alternativa, indicando normalidade nos dados.

#### 4.5.5 Teste de Sinais para compressão simples aos 28 dias de cura

No contexto dos desvios em torno da média, o valor z obtido foi de 0,7845, situando-se abaixo do valor z crítico de 2,3268, definido para um nível de significância de 1%. Com base no teste de sinais, aceita-se a hipótese nula, sugerindo que a distribuição dos desvios em torno da média segue a curva normal (curva de Gauss).

#### 4.5.6 Autocorrelação para compressão simples aos 28 dias de cura

A análise resultou em uma estatística de Durbin-Watson de 1,5322, estabelecida para um nível de significância de 1,0%. Tendo a autocorrelação positiva ( $DW < DL$ ) como  $DL = 1,07$  e a autocorrelação negativa ( $DW > 4-DL$ ) como  $4-DL = 2,93$ , conclui-se pelo teste de Durbin-Watson que não há autocorrelação nos dados.

### Equação 4

$$RC91D \text{ (kPa)} = \text{Exp}( 8,4210 + 0,10503 \times \text{Cimento (\%)}^{1/2} - 3,5114 \times 10^{-3} \times \text{Exp(PV (\%))}$$

#### 4.5.7 Correlação do Modelo para compressão simples aos 90 dias de cura

A análise dos dados revelou um coeficiente de correlação ( $r$ ) de 0,6931, indicando uma associação significativa. O valor t calculado foi de 5,849, que é consideravelmente maior que o valor t tabelado (ou t crítico) de 2,715, definido para

um nível de significância de 1,00%. Adicionalmente, foi observado um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,4804 e um coeficiente  $r^2$  ajustado de 0,4524. Com base nesses parâmetros, a correlação foi classificada como forte.

#### 4.5.8 Análise da Variância do Modelo para compressão simples aos 90 dias de cura

A tabela de análise de variância forneceu os seguintes resultados:

- Para regressão: Soma dos Quadrados = 0,719, GL = 2, Quadrados Médios = 0,359, e Função F = 17,11.
- Residual: Soma dos Quadrados = 0,777, GL = 37, Quadrados Médios =  $2,102 \times 10^{-2}$ .
- No total: Soma dos Quadrados = 1,497, GL = 39, Quadrados Médios =  $3,838 \times 10^{-2}$ .

O valor F calculado foi de 17,11, excedendo o F tabelado de 5,229 (para um nível de significância de 1,000%). A significância do modelo foi de  $5,5 \times 10^{-4}\%$ , com uma confiabilidade do modelo superior a 99,999%. Portanto, aceita-se a hipótese de existência da regressão.

#### 4.5.9 Correlações Parciais em Relação à Variável Dependente para compressão simples aos 90 dias de cura

As correlações parciais foram observadas como segue:

- RC91D (kPa): 1,0000
- Cimento (%): 0,5909
- Pó de Vidro (%): -0,4239

Esses coeficientes desempenham um papel crucial na formação do modelo, levando à aceitação da hipótese de que  $\beta$  é diferente de zero.

#### 4.5.10 Teste de Sinais para compressão simples aos 90 dias de cura

O teste revelou um valor z calculado de 0,0000, que é comparativamente menor que o valor z crítico de 2,3268, definido para um nível de significância de 1%. Com

base no teste de sinais, a hipótese nula foi aceita, afirmando que a distribuição dos desvios em torno da média segue a curva normal (curva de Gauss).

#### 4.5.11 Autocorrelação para compressão simples aos 90 dias de cura

A estatística de Durbin-Watson foi calculada como 1,2979 (nível de significância de 1,0%). Enquanto a autocorrelação positiva foi definida por  $DW < DL$ , com  $DL = 1,20$ , a autocorrelação negativa foi estabelecida por  $DW > 4-DL$ , com  $4-DL = 2,80$ . Contudo, o teste de Durbin-Watson foi inconclusivo. A autocorrelação (ou auto-regressão) só pode ser validamente identificada quando as amostragens são ordenadas conforme um critério conhecido. Em situações em que os dados estão aleatoriamente dispostos, o resultado (positivo ou negativo) não é considerado válido.

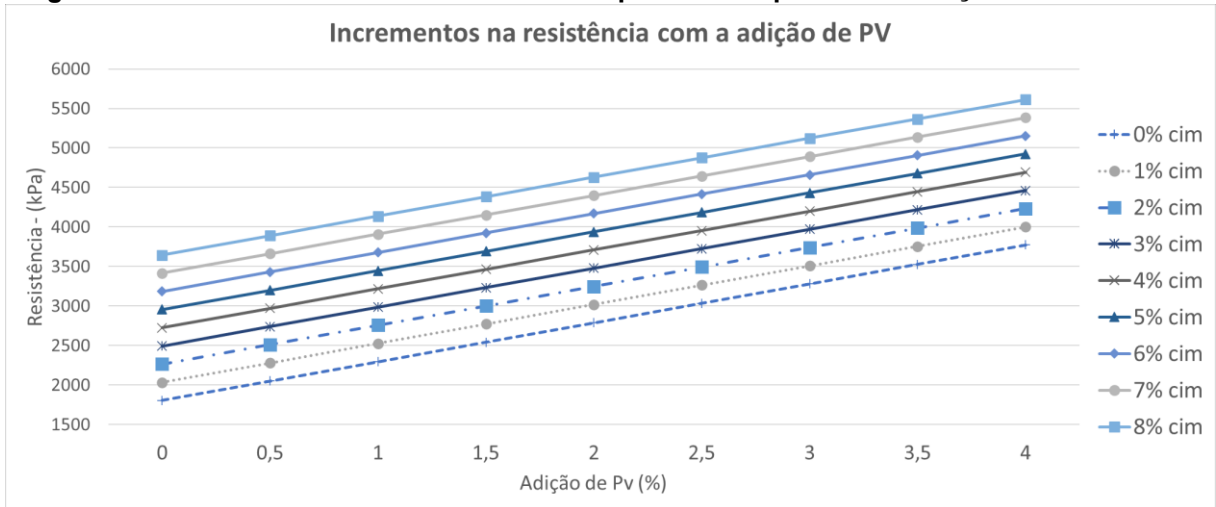
#### 4.5.12 Modelo tridimensional e incrementos na resistência para compressão simples

A equação proposta para o período de 28 dias é um modelo linear onde a retração, representada por RC28D, é influenciada diretamente pela percentagem de cimento e pó de vidro. A presença de coeficientes positivos sugere que o aumento das percentagens de cimento e pó de vidro resultará em um incremento da retração.

A natureza linear deste modelo indica que a relação entre os componentes e a retração é diretamente proporcional, ou seja, variações uniformes nas concentrações dos componentes resultam em alterações constantes no valor de RC28D.

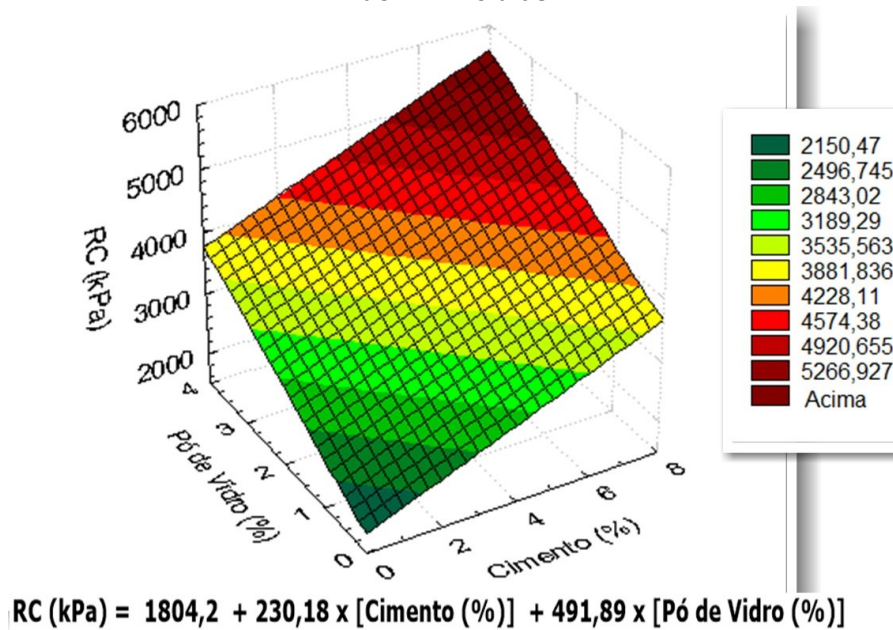
No gráfico representado pela Figura 13, é possível observar os acréscimos na resistência mecânica provenientes dos ensaios de compressão simples após 28 dias de processo de cura. As composições contendo solo-cimento exibem uma elevação na resistência quando incorporadas ao pó de vidro. Conforme delineado pela Equação 3, um modelo de tendência estabelecido, tais incrementos se manifestam de forma linear em consonância com os crescentes teores. Além disso, a Figura 14 apresenta uma representação tridimensional da aplicação da Equação 3, facilitando a interpretação de que a resistência se intensifica com a adição tanto do cimento quanto do pó de vidro, bem como de sua combinação conjunta.

**Figura 13 - Incrementos na resistência da compressão simples com a adição de PV - 28 dias**



Fonte: O autor (2023).

**Figura 14 - Representação tridimensional da resistência da compressão simples com a adição de PV - 28 dias**



$$RC \text{ (kPa)} = 1804,2 + 230,18 \times [\text{Cimento (\%)}] + 491,89 \times [\text{Pó de Vidro (\%)}]$$

Fonte: O autor (2023).

Em contrapartida, a equação correspondente ao período de 90 dias de cura apresenta uma forma mais complexa, incluindo funções exponenciais e radicais. Aqui, a retração, denotada pela equação 4, é modelada como uma função exponencial que depende das concentrações de cimento e pó de vidro.

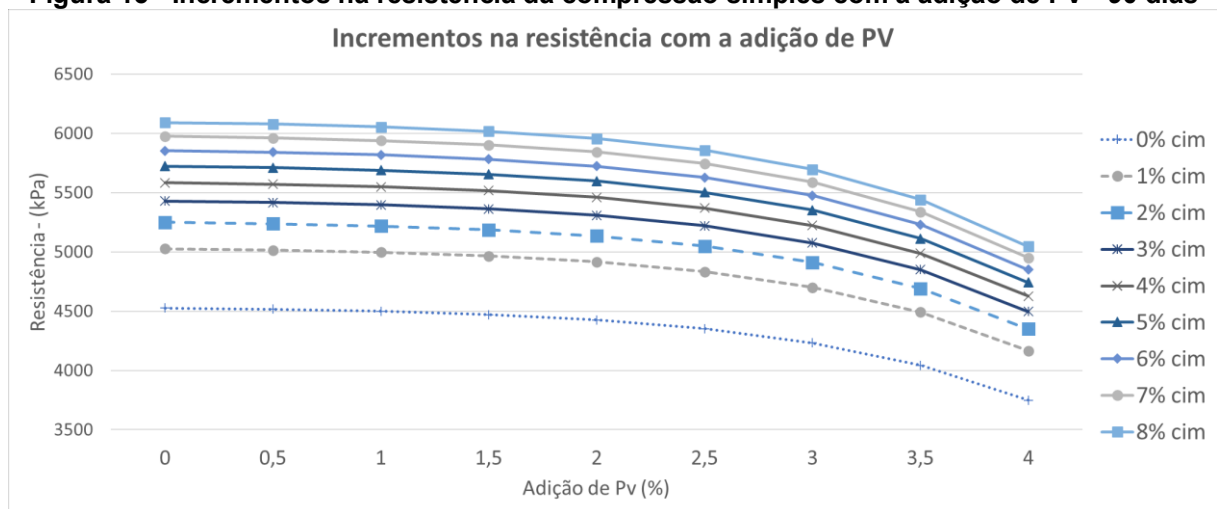
Este modelo sugere que a relação entre retração e os componentes não é linear para o período de 90 dias. A inclusão do termo exponencial para o pó de vidro indica que variações neste componente podem resultar em alterações exponenciais na retração, tornando esta relação particularmente sensível. Por outro lado, o termo radicalizado associado ao cimento mostra que o impacto deste componente é menos

acentuado, com o aumento da concentração de cimento influenciando a retração de forma sub-linear.

Na Figura 15 e 16, observa-se uma representação gráfica da variação da resistência mecânica em diversas amostras. No contexto de substratos de solo-cimento submetidos a um período de cura de 90 dias, destaca-se a diminuição da resistência mecânica em ensaios de compressão simples com a adição de pó de vidro. Entretanto, é essencial ressaltar que essa redução foi preponderantemente identificada nas amostras M1 e M8. Através da aplicação do modelo de tendência proposto pela Equação 4, reitera-se a correlação entre a introdução do pó de vidro nas amostras e a decrescente resistência mecânica.

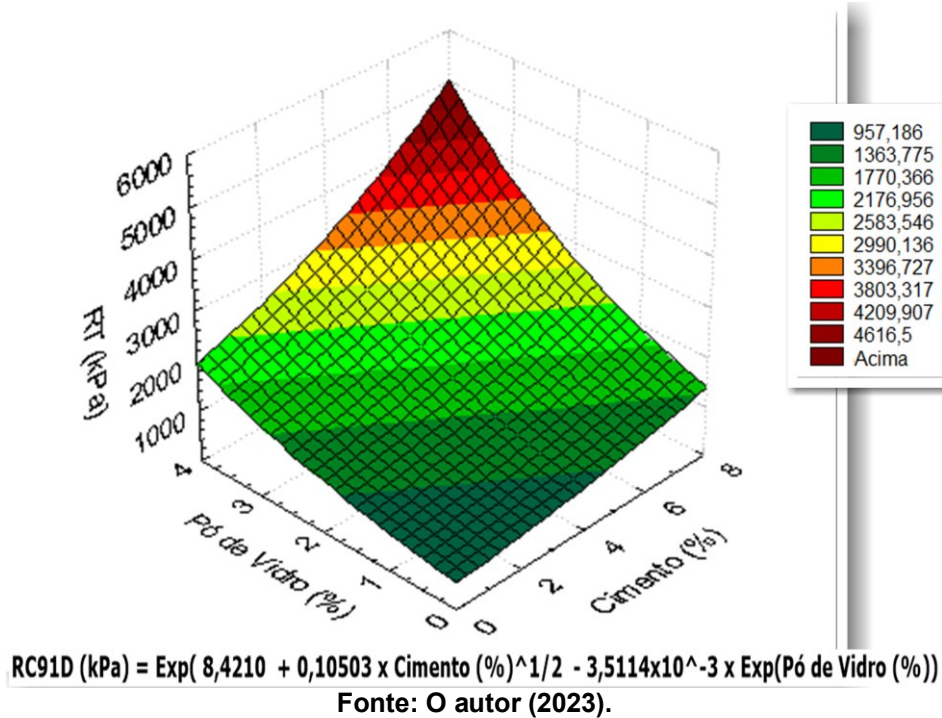
Estudos na literatura antecipam um incremento da resistência mecânica ao se integrar materiais finos de elevada atividade pozzolânica, categoria na qual se insere o pó de vidro. Considerando que o modelo proposto pela equação 4 apresentou incongruência, diversas hipóteses podem ser propostas. A declinação observada na resistência mecânica pode ser atribuída a uma série de fatores, tais como a heterogeneidade na dispersão do pó de vidro, reações químicas adversas, alterações na diluição da matriz cimentícia e interferências nos processos de hidratação. Além disso, as condições de umidade, sob as quais as partículas pozzolânicas reagem com os produtos de hidratação do cimento, e a umidade fixada, determinada pelo valor obtido do solo natural na energia modificada, podem não ter sido ideais para promover as reações pozzolânicas efetivamente (PUPALLA et al., 2015).

**Figura 15 - Incrementos na resistência da compressão simples com a adição de PV - 90 dias**



Fonte: O autor (2023).

Figura 16 - Representação tridimensional da resistência da compressão simples com a adição de PV - 90 dias



#### 4.6 Ensaios de tração por compressão diametral – Etapa 2

Para a 2ª etapa, também foram realizados ensaios de tração por compressão diametral para o solo natural e as misturas M1 ao M8, totalizando 9 combinações de misturas diferentes, fixados na energia modificada e com  $W_{ot}$  de 18,55% e  $\gamma_{d,max}$  de 17,2 kN/m<sup>3</sup>. A comparação de Médias para o teste de Tukey-Kramer para 95 % de nível de confiança gerou o quadro 17. Pelo teste de comparação de médias de Tukey-Kramer, existem diferenças estatísticas significativas entre as médias que apresentam letras diferentes a um nível de confiança de 95%:

Quadro 17 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 e 90 dias

ETAPA 2 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETERAL - (kPa)				
	28 DIAS		90 DIAS	
SOLO	538,24	E	2041,0	C
M1	2150,9	BA	2522,5	CBA
M2	1309,4	DC	2309,6	CB
M3	1162,8	D	1982,2	C
M4	1538,9	C	2669,1	CBA
M5	2002,3	B	2971,0	BA
M6	2364,8	A	3146,4	A
M7	1523,8	C	2528,5	CBA
M8	2073,6	B	2417,5	CBA

Fonte: O autor (2023).

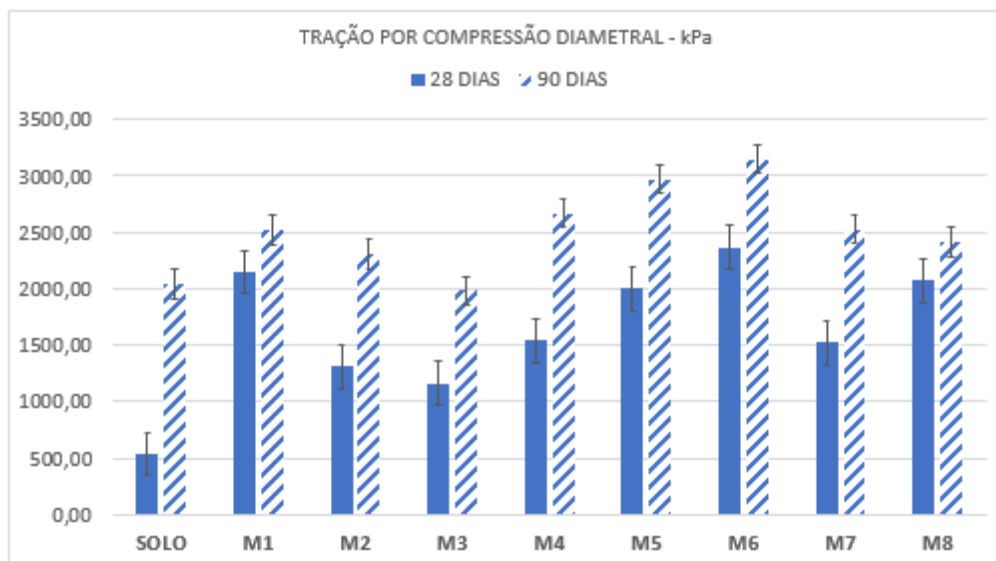
Observando os resultados, a adição de pó de vidro e cimento ao solo puro melhorou substancialmente a resistência à tração por compressão. O solo puro, sem aditivos, apresentou o valor mais baixo de resistência após 28 dias (538,24 kPa) e um aumento significativo após 90 dias (2041,0 kPa).

As amostras M1 e M8, com 4% de pó de vidro, mostraram um aumento considerável na resistência quando comparadas ao solo puro após 28 dias. A amostra M1, que contém apenas pó de vidro (4%), alcançou uma resistência de 2150,9 kPa após 28 dias, enquanto a M8, com 4% de pó de vidro e 8% de cimento, teve 2073,6 kPa.

A amostra M7, composta exclusivamente por 8% de cimento, atingiu 1523,8 kPa após 28 dias, indicando que o cimento também contribui para a resistência, mas talvez não tanto quanto o pó de vidro isoladamente. Contudo, a amostra M6, com 2% de pó de vidro e 6% de cimento, apresentou a resistência mais alta após 28 dias (2364,8 kPa), indicando uma sinergia positiva entre esses dois componentes.

Para todas as amostras, houve um aumento na resistência entre os períodos de 28 e 90 dias, indicando o desenvolvimento e maturação de reações cimentantes da mistura ao longo do tempo. A amostra M6, com 2% de pó de vidro e 6% de cimento, demonstrou a maior resistência após 90 dias (3146,4 kPa). Em contraste, a amostra de solo puro permaneceu como a de resistência mais baixa após 90 dias. A figura 17 ilustra os resultados de tração por compressão diametral para 28 e 90 dias.

**Figura 17 - Resultados de tração por compressão diametral para 28 e 90 dias**



Fonte: O autor (2023).

## 4.7 Análise estatística dos ensaios de tração por compressão diametral – Etapa 2

Este estudo empregou o software Infer32 para analisar a correlação entre variáveis como Cimento e Pó de Vidro em relação à resistência à tração em materiais sob diferentes períodos de cura. Foi aplicada a análise de regressão para períodos de cura de 28 e 90 dias.

Os modelos de regressão foram avaliados usando métricas estatísticas, incluindo o coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e análise de variância. O software resultou a equação 5 para a análise de 28 dias de cura, e a equação 6 para 90 dias de cura:

### Equação 5

$$RT \text{ (kPa)} = \text{Exp}( 6,3110 + 0,11735 \times [\text{Cimento (\%)}] + 0,3180 \times [\text{PV (\%)}])$$

#### 4.7.1 Correlação do Modelo para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

A análise de correlação indicou um coeficiente ( $r$ ) de 0,9790. O valor  $t$  obtido foi expressivamente elevado, sendo de 27,14, superando o valor  $t$  tabelado (ou  $t$  crítico) de 2,738, definido para um nível de significância de 1,00%. Foi registrado um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,9584 e um coeficiente  $r^2$  ajustado de 0,9558. Com base nestes dados, a correlação foi classificada como fortíssima.

#### 4.7.2 Análise da Variância do Modelo para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

Os resultados da análise de variância foram:

- Regressão: Soma dos Quadrados = 6,631, GL = 2, Quadrados Médios = 3,315 e Função F = 368,4.
- Residual: Soma dos Quadrados = 0,287, GL = 32 e Quadrados Médios =  $8,999 \times 10^{-3}$ .
- Total: Soma dos Quadrados = 6,919, GL = 34 e Quadrados Médios = 0,203.

O valor F calculado foi de 368,4, ultrapassando consideravelmente o F tabelado de 5,336, estabelecido para um nível de significância de 1,000%. A



significância do modelo atingiu um valor ínfimo de  $8,1 \times 10^{-21}\%$ , e a confiabilidade do modelo superou os 99,999%. Portanto, aceita-se a hipótese de existência da regressão.

#### 4.7.3 Correlações Parciais para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

Foram identificadas as seguintes correlações parciais:

- RT (kPa): 1,0000
- Cimento (%): 0,3718
- Pó de Vidro (%): 0,7364

O valor t tabelado (t crítico) foi novamente confirmado como 2,738 para um nível de significância de 1,00%. Ressalta-se a relevância dos coeficientes para a configuração do modelo. Assim, aceita-se a hipótese de que  $\beta$  é distinto de zero.

#### 4.7.4 Teste de Kolmogorov-Smirnov para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

O teste apresentou uma maior diferença de  $7,747 \times 10^{-2}$ , enquanto o valor crítico foi de 0,2690, considerando um nível de significância de 1%. Com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, aceita-se a hipótese alternativa, indicando normalidade nos dados.

#### 4.7.5 Teste de Sinais para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

Relativamente aos desvios em torno da média, o valor z calculado foi de 0,1690, situando-se abaixo do valor z crítico de 2,3268, definido para um nível de significância de 1%. A partir do teste de sinais, aceita-se a hipótese nula, corroborando a ideia de que a distribuição dos desvios em relação à média é condizente com a curva normal (curva de Gauss).

#### 4.7.6 Autocorrelação para tração por compressão diametral aos 28 dias de cura

A análise resultou em uma estatística de Durbin-Watson de 1,1622, estabelecida para um nível de significância de 1,0%. Tendo a autocorrelação positiva ( $DW < DL$ ) como  $DL = 1,20$  e a autocorrelação negativa ( $DW > 4-DL$ ) como  $4-DL = 2,80$ , o teste de Durbin-Watson indica a presença de autocorrelação positiva. Contudo, a veracidade deste resultado não é conclusiva devido à disposição aleatória dos dados. A autocorrelação (ou auto-regressão) é determinável apenas quando as amostragens estão classificadas de acordo com um critério preestabelecido. Em contextos onde os dados estão aleatoriamente dispostos, os resultados não são conclusivos.

#### Equação 6

$$RT91D \text{ (kPa)} = \text{Exp}(7,6990 + 1,4852 \times 10^{-2} \times \text{Cimento (\%)} + 0,04166 \times \text{PV (\%)})$$

#### 4.7.7 Correlação do Modelo para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura

Na análise proposta, o coeficiente de correlação ( $r$ ) foi de 0,4462, demonstrando uma associação considerável. O valor  $t$  obtido foi de 2,992, que se aproxima do valor  $t$  tabelado (ou  $t$  crítico) de 2,719, estabelecido para um nível de significância de 1,00%. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) apurado foi de 0,1991, com um coeficiente  $r^2$  ajustado de 0,1546. Estes dados indicam uma classificação de correlação média.

#### 4.7.8 Análise da Variância do Modelo para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura

A análise de variância forneceu os seguintes resultados:

- Para regressão: Soma dos Quadrados = 0,189, GL = 2, Quadrados Médios =  $9,496 \times 10^{-2}$  e Função F = 4,475.
- Residual: Soma dos Quadrados = 0,763, GL = 36 e Quadrados Médios =  $2,121 \times 10^{-2}$ .

- No total: Soma dos Quadrados = 0,953, GL = 38 e Quadrados Médios =  $2,509 \times 10^{-2}$ .

O valor F calculado alcançou 4,475, enquanto o F tabelado foi de 5,248, com base em um nível de significância de 1,000%. A significância do modelo atingiu 1,8%, e a confiabilidade do modelo foi de 98,2%.

#### 4.7.9 Correlações Parciais para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura

As correlações parciais foram identificadas da seguinte maneira:

- RT91D (kPa): 1,0000
- Cimento (%): 0,2474
- Pó de Vidro (%): 0,3579

O valor t tabelado (t crítico) foi novamente confirmado como 2,719 para um nível de significância de 1,00%. Enfatiza-se a relevância dos coeficientes na estruturação do modelo, levando à aceitação da hipótese de que  $\beta$  é distinto de zero.

#### 4.7.10 Teste de Sinais para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura

Para desvios em torno da média, o valor z calculado foi de 0,1601, situando-se bem abaixo do valor z crítico de 2,3268 (definido para um nível de significância de 1%). Com base no teste de sinais, aceita-se a hipótese nula, corroborando a ideia de que a distribuição dos desvios em relação à média é condizente com a curva normal (curva de Gauss).

#### 4.7.11 Autocorrelação para tração por compressão diametral aos 90 dias de cura

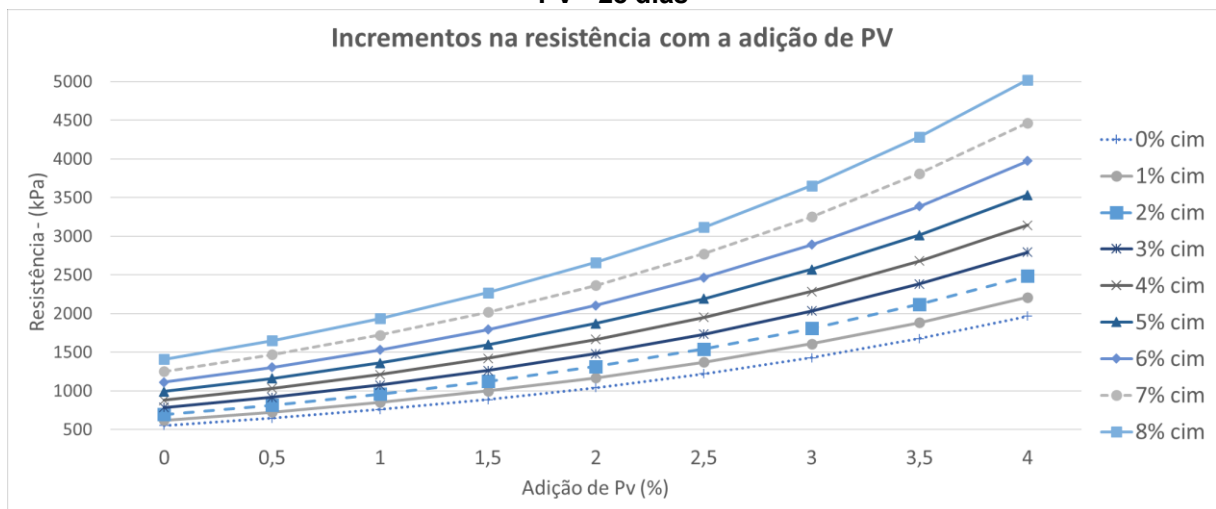
A análise demonstrou uma estatística de Durbin-Watson de 1,1403, estabelecida para um nível de significância de 1,0%. Considerando a autocorrelação positiva ( $DW < DL$ ), o valor de DL foi de 1,20, e para autocorrelação negativa ( $DW > 4-DL$ ), o valor foi de 2,80. A partir do teste de Durbin-Watson, identificou-se a presença de autocorrelação positiva.

#### 4.7.12 Modelo tridimensional e incrementos na resistência para tração por compressão diametral

Para a regressão de 28 dias (Equação 5), observou-se uma "Correlação Fortíssima" com um coeficiente de correlação ( $r$ ) de 0,9790. Aproximadamente 95,84% da variabilidade da variável dependente foi explicada pelas variáveis independentes, demonstrando a robustez do modelo. A significância estatística foi confirmada com um valor  $F$  calculado de 368,4, superando o valor  $F$  tabelado.

A Figura 18 destaca a progressão da resistência do solo-cimento, conforme evidenciado pelos ensaios de tração por compressão diametral, ao término de um ciclo de cura de 28 dias. A avaliação dos dados indica uma ascensão exponencial da resistência ao se adicionar variados teores de pó de vidro. Paralelamente, a Figura 19 também apresenta uma representação tridimensional da variação da resistência, correlacionada aos diferentes teores de pó de vidro.

**Figura 18 - Incrementos na resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 28 dias**



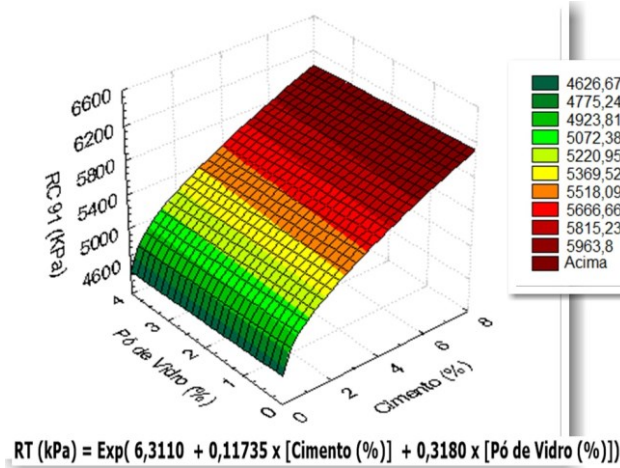
Fonte: O autor (2023).

Para a regressão de 90 dias (Equação 6), o coeficiente de correlação ( $r$ ) foi de 0,4462, indicando uma relação moderada. Apenas cerca de 19,91% da variação na variável dependente foi explicada pelo modelo. A análise de variância confirmou a relevância estatística do modelo, embora com menor relevância em comparação com o modelo de 28 dias.

A adição de cimento e pó de vidro influenciou notavelmente a resistência à tração do material. O modelo para 28 dias de cura demonstrou uma correlação

extremamente forte, enquanto o modelo para 90 dias indicou uma correlação moderada.

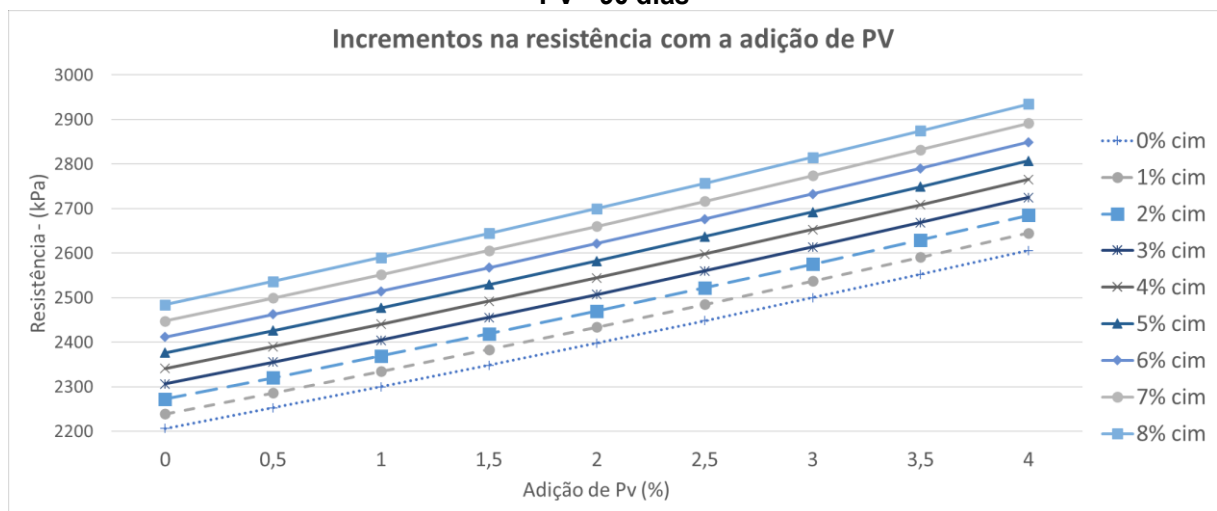
**Figura 19 - Representação tridimensional da resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 28 dias**



Fonte: O autor (2023).

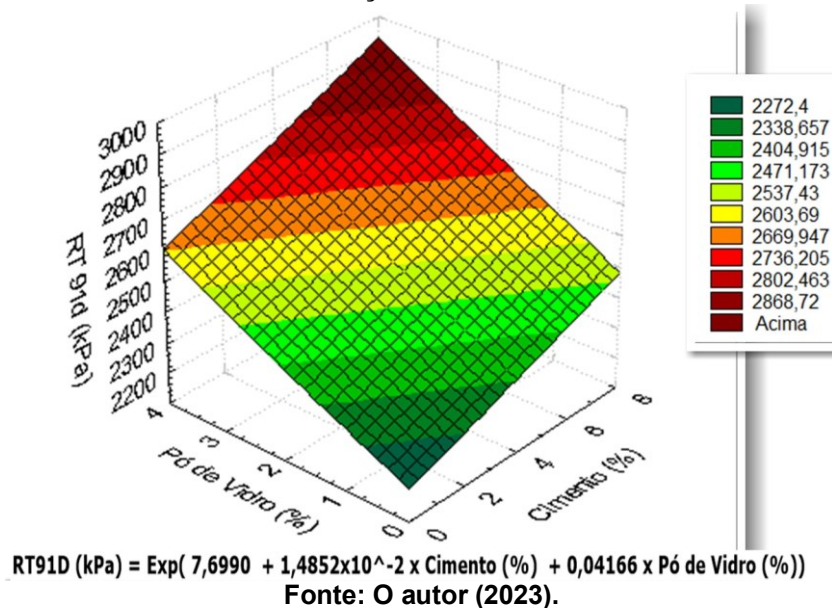
A Figura 20 ilustra a evolução da resistência do solo-cimento evidenciada nos ensaios de tração por compressão diametral, após um período de cura de 90 dias. A análise dos dados sugere uma tendência de crescimento linear da resistência com a incorporação de diferentes teores de pó de vidro. Adicionalmente, uma representação tridimensional dessa variação da resistência em função dos teores de pó de vidro é representada na Figura 21.

**Figura 20 - Incrementos na resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 90 dias**



Fonte: O autor (2023).

**Figura 21 - Representação tridimensional da resistência da tração por compressão diametral com a adição de PV - 90 dias**



Em comparativo entre as equações, a constante na equação 5 foi de 6,3110, enquanto na equação 6 foi 7,6990. Esse aumento sugere uma maior resistência à tração base para os 90 dias em comparação com os 28 dias, independentemente das quantidades de cimento e pó de vidro, correspondente ao esperado na literatura.

No período de 28 dias, o coeficiente associado ao Cimento é 0,11735, enquanto para o período de 90 dias, ele diminui significativamente para  $1,4852 \times 10^{-2}$ . Isso indica que, embora o Cimento ainda exerça um efeito positivo na resistência à tração ao longo do tempo, essa influência é diminuída no período mais longo.

O coeficiente do Pó de Vidro na equação 5 (28 dias) é 0,3180 e na equação 6 (90 dias) é 0,04166. Assim como o Cimento, a influência do Pó de Vidro sobre a resistência à tração também diminui ao longo do tempo, mas ainda permanece positiva.

A equação 5 indica uma maior sensibilidade tanto ao Cimento quanto ao Pó de Vidro em 28 dias em comparação com 90 dias. O modelo resulta na resistência inicial à tração ser mais facilmente manipulada pela adição de Cimento e Pó de Vidro do que a resistência em um período de cura mais prolongado.

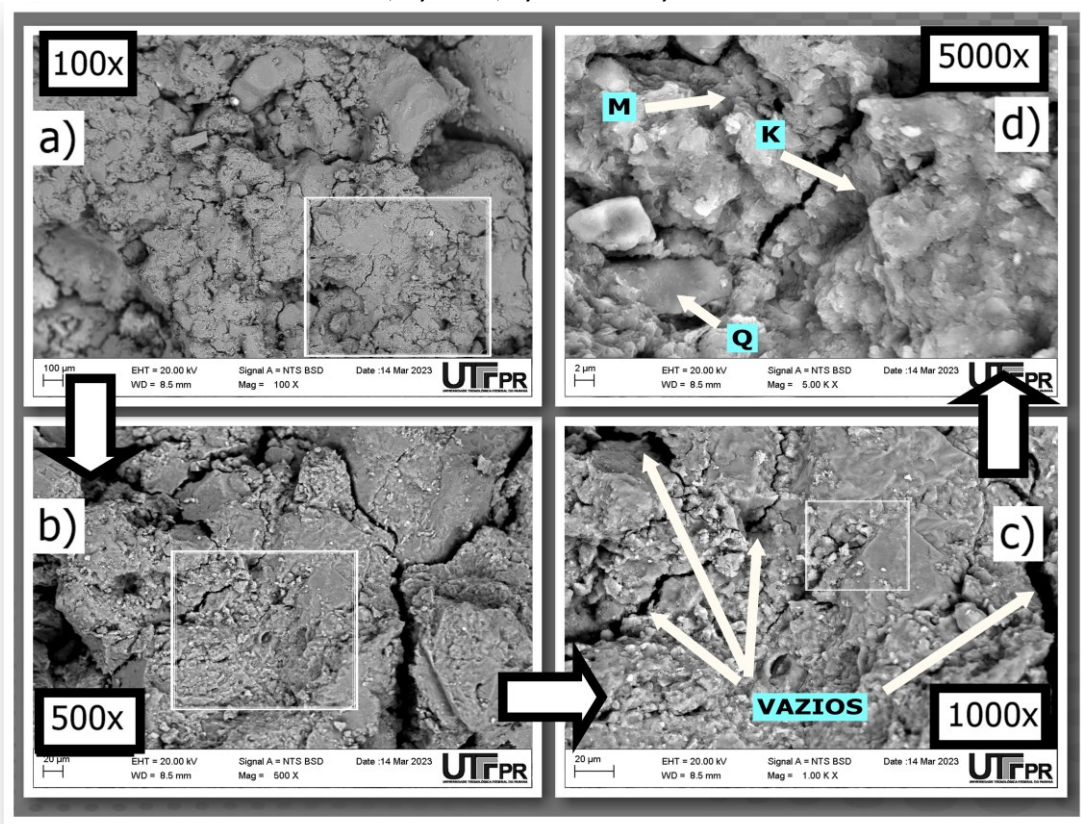
#### **4.8 Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras**

Utilizando a técnica de espectrofotometria por Fluorescência de Raios-X, foi possível identificar os principais minerais presentes no solo analisado, sendo eles

quartzo, caulinita, montmorilonita e hematita. É possível notar que minerais como quartzo e caulinita são típicos de solos finos localizados nas regiões tropicais e subtropicais do sul do Brasil, conforme documentado por BORTOLUZZI, PERNES e TESSIER (2007). Segundo os autores estes minerais têm uma relação estreita com a expansividade dos solos, potencializando sua propriedade de expansão.

A caracterização mineral do solo reforçou a sua classificação como expansivo, estando em consonância com as observações anteriores de Felipe (2011), que descreveu minerais semelhantes na terceira camada da formação Guabirotuba, enfatizando sua natureza expansiva. Além desses minerais, foi detectado um teor considerável de 32,25% de  $Al_2O_3$  no solo, apontando para a presença de minerais de alumínio, com destaque para a alumina. A alumina é um mineral recorrente em argilas, o que reforça a composição argilosa do solo em estudo. A Figura 22 apresenta representações gráficas desses componentes minerais, permitindo a identificação visual de elementos como Q (quartzo), K (caulinita) e M (montmorilonita).

**Figura 22 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do solo com diferentes ampliações: a) 100x, b) 500x, c) 1000x e d) 5000x.**



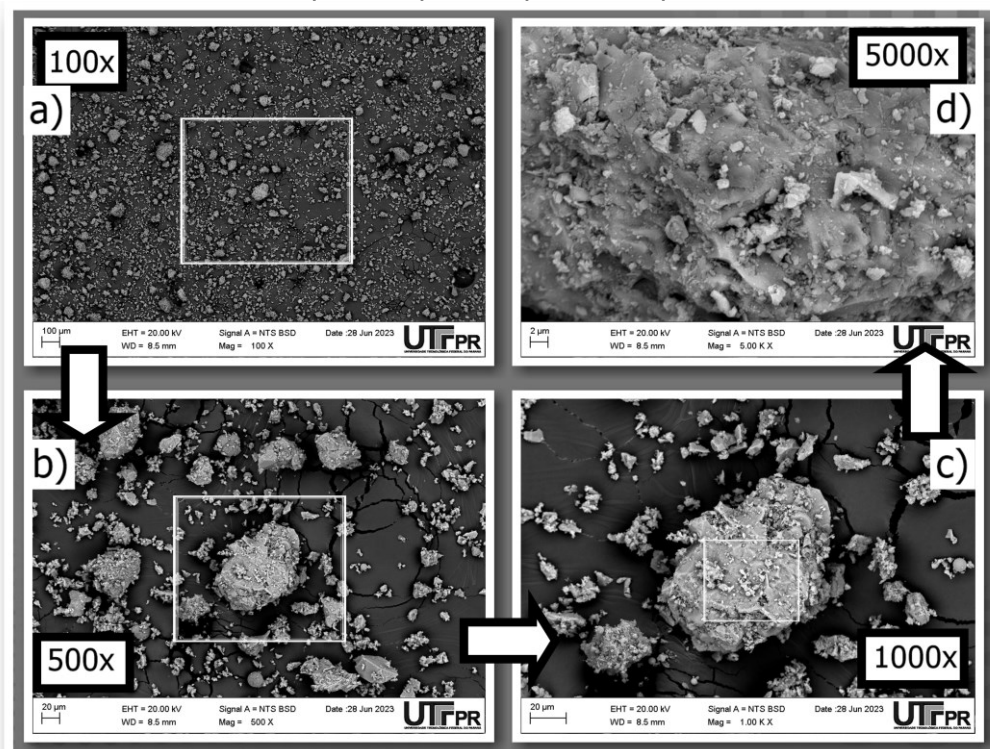
Fonte: O autor (2023).

Em relação ao cimento, ilustrado na Figura 23, destaca-se a predominância do óxido de cálcio (CaO) como mineral significativo. O papel do cálcio é crucial na

síntese dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados durante a hidratação do cimento. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu visualizar as partículas de CaO predominantemente como aglomerados ou grânulos, apresentando a dispersão e dimensão das partículas cimentícias.

Por meio da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), identificou-se também a presença do SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício), essencial na formação dos silicatos durante o processo de hidratação do cimento. A análise MEV revelou diversas morfologias das partículas de SiO<sub>2</sub>, incluindo esferas, grânulos e aglomerados, elucidando aspectos sobre sua distribuição e morfologia.

**Figura 23: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do cimento com diferentes ampliações: a) 100x, b) 500x, c) 1000x e d) 5000x.**



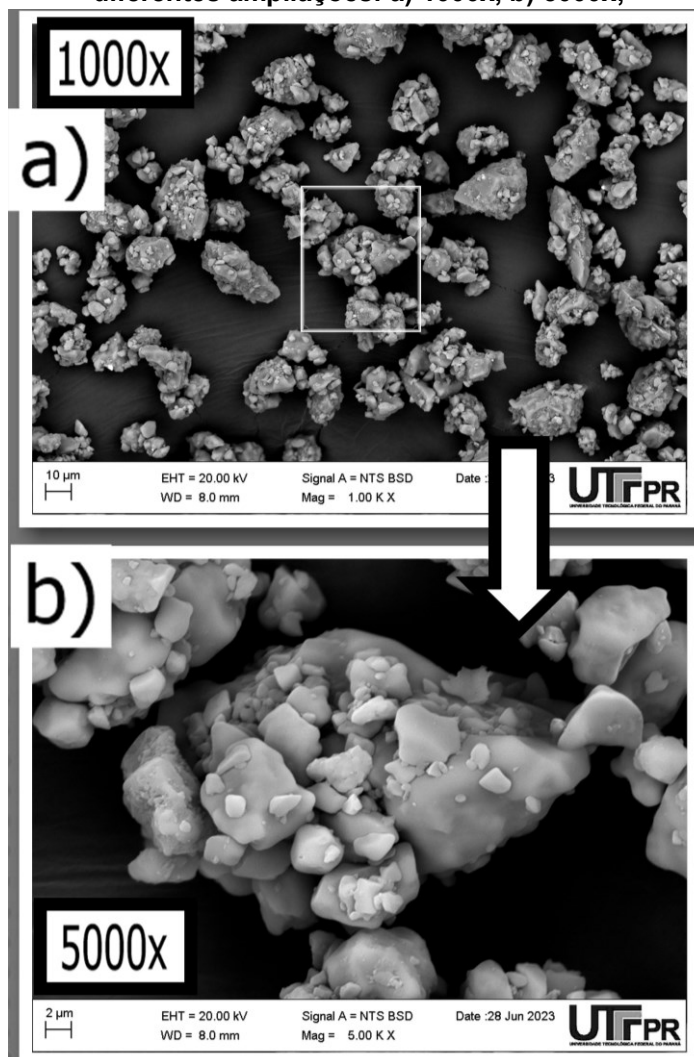
Fonte: O autor (2023).

Adicionalmente, outros elementos químicos, como SO<sub>3</sub> (trióxido de enxofre), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio), K<sub>2</sub>O (óxido de potássio) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de ferro III), foram detectados no cimento, ainda que em concentrações inferiores. Estes elementos, embora em menor proporção, são fundamentais nas reações pozolânicas que culminam na formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), atribuindo ao cimento suas notáveis propriedades aglomerantes, conforme evidenciado por estudos de Tastan et al. (2011) e Ghorbani e Hasanzadehshooili (2018) na literatura especializada.



Na amostra de pó de vidro, foi identificada uma concentração elevada de SiO<sub>2</sub>, indicando 88,925% da composição, destacando a predominância de sílica (dióxido de silício). Este elemento é notável por conferir ao material seu caráter amorfo. Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), observam-se partículas amorfas de morfologia irregular, desprovidas de estrutura cristalina. A presença de grãos de sílica no pó de vidro é também evidente.

**Figura 24 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó de vidro com diferentes ampliações: a) 1000x, b) 5000x;**



**Fonte: O autor (2023).**

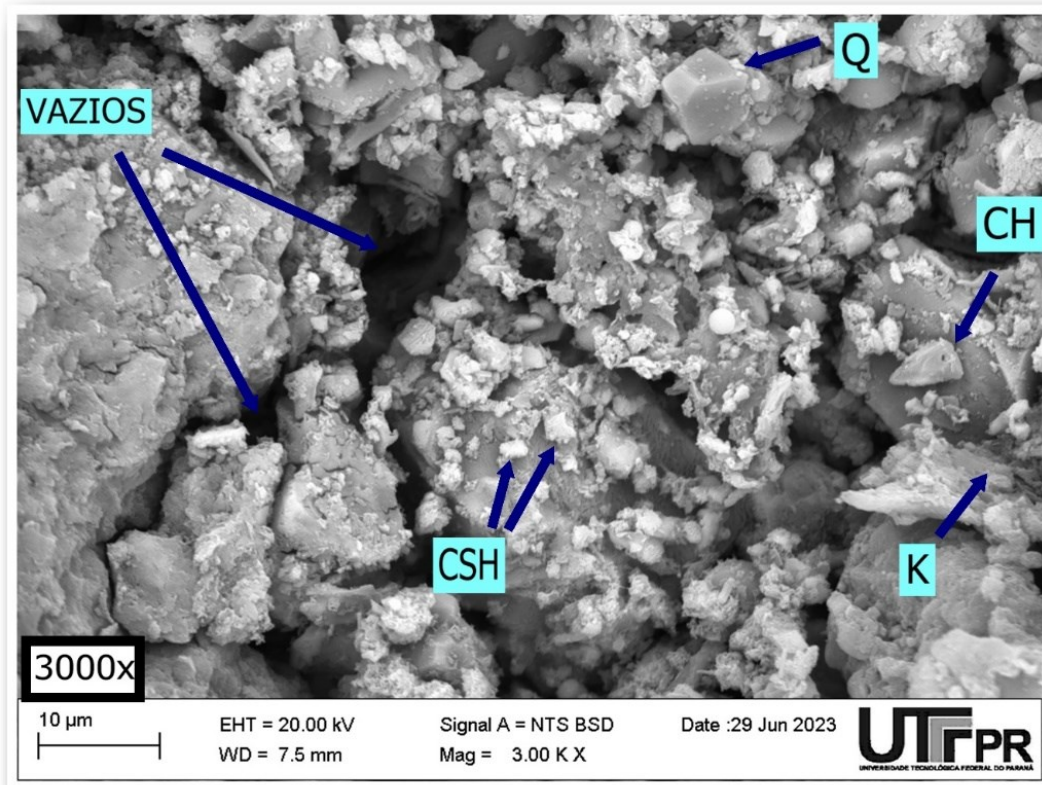
A representação MEV, conforme delineado na Figura 24, denota uma diversidade tanto no tamanho quanto na morfologia desses grãos de sílica. A sílica desempenha um papel primordial na fabricação de vidro, sendo diretamente responsável por atributos fundamentais do material, como transparência, dureza e resistência mecânica.

As micrografias derivadas do ensaio de MEV para o pó de vidro (PV) indicam, conforme ilustrado na Figura 24, que as partículas aglomeradas exibem uma morfologia irregular, embora apresentem dimensões aproximadamente homogêneas. Em uma análise mais detalhada, é possível discernir partículas individualizadas com uma forma majoritariamente cúbica e superfície lisa. Tal caracterização morfológica do PV sodo-cálcico já foi previamente evidenciada em estudos conduzidos por Sales (2014) e Busch (2016).

Com a realização do ensaio para as amostras com composições variadas de cimento e pó de vidro, a amostra designada como M8 e representada pela figura 25, que integra solo, acrescido de 8% de cimento e 4% de pó de vidro, destacou-se. Por meio dos registros durante a realização do ensaio do MEV foi possível identificar marcadores químicos consistentes com a reação esperada entre os componentes da mistura. Notadamente, observou-se a presença de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH) evidenciando as reações pozolânicas entre o pó de vidro e o cimento. Tal observação está alinhada com a literatura existente, consolidando a hipótese de que a interação entre esses materiais promove a formação desses compostos.

Além disso, por meio de técnicas de difração de raios-X, foram identificados minerais intrínsecos ao solo, como quartzo, caulinita e hematita, corroborando com o perfil mineralógico esperado para o solo em questão. A predominância destes minerais está em consonância com as conclusões de pesquisas anteriores realizadas por Pudell (2022), Munoz (2021), Almeida (2022) e Baldovino (2018).

Figura 25 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da mistura M8



Fonte: O autor (2023).

## 5. CONCLUSÃO

A partir do programa experimental, da apresentação, da análise e da discussão dos resultados apresentados foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- A adição de cimento e pó de vidro ao solo mostrou influência nos limites de Atterberg e no índice de plasticidade, ajustando as misturas e tornando-as mais plásticas com faixas de umidade mais restritas. Contudo, a classificação SUCS e HRB se manteve constante, indicando baixa plasticidade.
- Os ensaios de compactação mostraram uma diminuição na densidade máxima e um aumento na umidade ótima com o aumento dos teores de cimento e pó de vidro, alinhando-se às tendências observadas em outras pesquisas.
- Quanto aos ensaios de compressão simples realizados para um tempo de cura de 28 dias com diferentes teores de cimento e pó de vidro, o modelo de regressão apontou um aumento linear em todas as amostras, estabelecendo fortes correlações entre as variáveis de cimento e pó de vidro. No entanto, para amostras curadas por 90 dias, não foi percebido aumento de resistência em todas elas quando comparadas com o período de 28 dias.
- O modelo de regressão de compressão simples aos 90 dias apresenta uma diminuição na resistência com a adição progressiva de pó de vidro. Fatores como porosidade elevada, maior inclusão de ar e inconsistências na homogeneização da mistura podem explicar esta redução na resistência. Com base nesses ensaios, a correlação com o pó de vidro não se mostrou definitiva como tendência.
- Os ensaios de tração por compressão diametral, referentes ao tempo de cura de 28 dias, indicaram um aumento exponencial na resistência em todas as amostras, demonstrando fortes correlações com o pó de vidro. A adição de ambos, cimento e pó de vidro, influenciou significativamente a resistência à tração do material. O

modelo referente a 28 dias de cura revelou uma correlação extremamente forte, enquanto para 90 dias a correlação foi moderada.

- Os coeficientes associados ao cimento e ao pó de vidro nas equações regressivas revelaram que, enquanto ambos os aditivos contribuem positivamente para a resistência à tração, porém essa influência tende a diminuir com o tempo, sendo mais sensível no período inicial de 28 dias. Mesmo com 90 dias, o modelo de regressão ainda exibiu um aumento na resistência de todas as amostras.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Executar ensaios de resistência mecânica com amostras coletadas em campo, visando comparar resultados laboratoriais e práticos. Esse método avaliará a precisão dos modelos em ambientes controlados e sua pertinência em contextos reais, provendo otimização de técnicas de estabilização do solo.
- Conduzir ensaios de módulo de resiliência e CBR (California Bearing Ratio) para as misturas de solo-cimento e pó de vidro. Em seguida, criar modelos de regressão, correlacionando os resultados desses ensaios com as resistências mecânicas obtidas. Comparar os resultados com os parâmetros mínimos para o dimensionamento de camadas de pavimento no Brasil e no mundo.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos - apresentação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7222**: Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 12770**: Solo Coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6023:** informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6502:** Rochas e solos - Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 10520:** informação e documentação: citações em documentos - apresentação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

ABREU, W. M. de. **Estudo da temperatura de transição vítrea (Tg) em vidros orgânicos:** Mel, corante caramelo e frutose. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia dos alimentos) - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2008.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro.** [S. l.: s. n.], 2000.

ALCÂNTARA, M. A. D. M.; DOS SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; DE LIMA, D. C. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal.** Revista Materia, v. 22, n. 3, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0209>

ANCAT. **Anuário da Reciclagem.** [s. l.], 2020. Disponível em: <http://anuariodareciclagem.eco.br/interna>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos.** 2012. - Universidade Federal do Espírito Santo, [s. l.], / Part VI. Medical Questions

ALCÂNTARA, M. A. D. M.; DOS SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; DE LIMA, D. C. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal.** Revista Materia, v. 22, n. 3, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0209>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ANCAT. **Anuário da Reciclagem.** [S. l.], 2020. Disponível em: <http://anuariodareciclagem.eco.br/interna>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ARBA, A. R. B. A. S. S. on L. **Lime-treated soil construction manual: Lime stabilization & Lime Modification.** United States: National Lime Association, 2004.

ARULRAJAH, A.; KUA, T. A.; SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S. **Stiffness and strength properties of spent coffee grounds-recycled glass geopolymers.** Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. 3, p. 623–638, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1408483>.

ASTM. D 2487-06: **Classification of Soils for Engineering Purposes: Unified Soil Classification System.** In: 2017, ASTM International. [S. l.: s. n.]

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. **Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil**. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 188–194, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.001>.

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

BALDOVINO, J. de J. A. **Contribuição ao estudo da estabilização e geopolimerização de um solo siltoso da formação Guabirotuba melhorado com pó de vidro e lama de cal**. 2021a. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

BATALIONE, G. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2007. [S. l.], 2007.

BENNY, J. R.; K, J. J.; SEBASTIAN, J. M.; THOMAS, M. **Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil**. *International Journal of Research & Technology*, v. 6, n. 05, May, p. 228–231,

BORDIGNON, V. R. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/1701>. Acesso em: 14 jul. 2021.

BRASIL. **DNER-ME093/94: Solos - Determinação da densidade real dos grãos**. In: 1994, Rio de Janeiro - RJ. Rio de Janeiro - RJ: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994. p. 4.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. **Estabilização de Solos**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, edição 06, ano 02, vol. 01, pp. 425-438, setembro de 2017. ISSN: 2448-0959.

BUSCH, P. de F. **Efeito da incorporação de resíduo de processamento de lapidação de vidro sodo-cálcicos nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmica vermelha**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, [s. l.], 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. 9a ed. [S. l.]: LTC, 2018.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: Aplicação ao processo de geopolimerização**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 1995.

CASTRO, G. R.; RABAÇA, S. R.; LUIS, A. D.; FERRI, S.; SANTOS, C. R.; LOPES, F. M.; SUZUKI, C. Y. **Estabilização de solos in situ com uso de cimento Portland para composição das camadas de infraestrutura do pavimento do Rodoanel trecho Sul/SP**. Porto Alegre: [s. n.], 2011.



CELEPAR. ITCG - **Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná**. [s. l.], 2021. Disponível em: [http://www.geoitcg.pr.gov.br/geoitcg/pages/templates/initial\\_public.jsf?windowId=1f0#1](http://www.geoitcg.pr.gov.br/geoitcg/pages/templates/initial_public.jsf?windowId=1f0#1). Acesso em: 10 maio. 2021.

CEMPRE. **Lixo municipal - manual de gerenciamento integrado**. 4a edição ed. São Paulo: PÁGINAS & LETRAS, 2018. E-book. Disponível em: [http://cempre.org.br/upload/Lixo\\_Municipal\\_2018.pdf](http://cempre.org.br/upload/Lixo_Municipal_2018.pdf).

CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. 3 ed. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CHOOBBASTI, A. J.; GHODRAT, H.; VAHDATIRAD, M. J.; FIROUZIAN, S.; BARARI, A.; TORABI, M.; BAGHERIAN, A. **Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime**. *Frontiers of Earth Science in China*, v. 4, n. 4, p. 471–480, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11707-010-0138-x>.

COELHO, A. Z.; TORRAL, F. P.; JALALI, S. **A cal na construção**. Portugal: Guimarães: TecMinho, 2009.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A. J.; GAUER, E. A.; DOS SANTOS, V. R.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. **Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures**. *Geotechnique Letters*, v. 2, n. 7–9, p. 81–85, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00014>.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; LOPES, L. da S.; WINTER, D. **Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil**. *Transportation Geotechnics*, v. 1, n. 3, p. 129–136, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.07.005>.

CONSOLI, N. C.; SAMANIEGO, R. A. Q.; VILLALBA, N. M. K. **Durability, Strength, and Stiffness of Dispersive Clay–Lime Blends**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 11, p. 1–11, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001632](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001632).

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 9, p. 04018057, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001928](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001928).

CORREA, B. R. S. **Análise da resistência, rigidez e durabilidade de misturas de vidro moído e cal de carbureto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2020.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2009.

DALLA ROSA, A. **A eficiência da cal para base de pavimentos utilizando um solo representativo da região metropolitana de Curitiba/PR**. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323202163>. Acesso em: 14 jul. 2021.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DIAS, J. da F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, [s. l.], 2012.

ELY, João Paulo Reichelt; CALGAGNO, Carmem Iara Walter. **Obtenção e caracterização de nanocompósitos com montmorilonita**. In: Salão de Iniciação Científica, 17., 2005 out. 17-21, UFRGS, Porto Alegre, RS. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/38890>. Acesso em: 05 jan. 2023.

ESTABRAGH, A. R.; PERESHKAFTI, M. R. S.; PARSAEI, B.; JAVADI, A. A. **Stabilised expansive soil behaviour during wetting and drying**. International Journal of Pavement Engineering, v. 14, n. 4, p. 418–427, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.746688>.

FAGUNDES, L. P. **Utilização de resíduo de cerâmica proveniente de olarias para estabilização de solo laterítico**. Ilha Solteira: [s. n.], 2019.

FELIPE, S. **Características geológico-geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba**. In: MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná. [S. l.: s. n.], v. 1. edição, p. 48.

FILHO, H. C. S. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro e cal de carbureto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2019.

FILOGÔNIO, P. H. de C. **Valorização do resíduo de lapidação de vidros planos para obtenção de cerâmica vermelha**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Federal do Espírito Santo, [s. l.], 2016.

GSCHÖSSER, F.; WALLBAUM, H.; BOESCH, M. E. **Life-Cycle Assessment of the Production of Swiss Road Materials**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24, n. 2, p. 168–176, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000375](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000375).

GÜLLÜ, H.; CANAKCI, H.; AL ZANGANA, I. F. **Use of cement-based grout with glass powder for deep mixing**. Construction and Building Materials, v. 137, p. 12–20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.070>.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de materiais de construção básicos**. [S. l.]: Universidade Aberta do Brasil e Instituto Federal Sul-rio-grandense, 2011.

HARICHANE, K.; GHRICI, M.; KENAI, S.; GRINE, K. **Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 29, n. 5, p. 759–769, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9415-z>.

HIGUCHI, A. M. B. **Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, [s. l.], 2018.

IAT. **Glossário Geológico**. 2023. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Glossario-Geologico>. Acesso em: 05 jan. 2023.

IBRAHIM, H. H.; MAWLOOD, Y. I.; ALSHKANE, Y. M. **Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq**. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 15, n. 4, p. 496–503, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1647644>.

KAWAHASHI, J.; JUNIOR, R. B. T.; TATSUTA, E. K.; BALBO, J. T.; BALZAN, D. C. **Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação**. *Transportes*, v. XVIII, n. 2, p. 2237–1346, p. 5–16, 2010. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/transportes.v18i2.418>.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. 2002. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2002.tde-20072009-092526>.

LEITE, R.; CARDOSO, R.; CARDOSO, C.; CAVALCANTE, E.; DE FREITAS, O. **Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil**. *E3S Web of Conferences*, v. 9, p. 2–6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914005>.

LITTLE, D. N. **Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime**. [S. l.]: Kendall/Hunt Publishing Company, 1995.

LITTLE, D. N.; NAIR, S. NCHRP **Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials**. College Station, Texas: [s. n.], 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/22999>.

LIU, Y.; SU, Y.; NAMDAR, A.; ZHOU, G.; SHE, Y.; YANG, Q. **Utilization of cementitious material from residual rice husk ash and lime in stabilization of expansive soil**. *Advances in Civil Engineering*, v. 2019, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/5205276>.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2004.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and Pozzolanic Cements**. In: HEWLETT, P. C. (org.). *LEA'S Chemistry of cement and concrete*. Fourth ed. [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2004. p. 471–602.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulin em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2011.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and Pozzolanic Cements**. In: HEWLETT, P. C. (org.). *LEA'S Chemistry of cement and concrete*. Fourth ed. [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2004. p. 471–602.

MOHAJERANI, A. et al. **Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review**. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 443–467, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>.

MUÑOZ, Y. O. **Estudo do comportamento tensão-deformação e estabilidade de talude de solo melhorado para aplicação em aterros rodoviários**. 2021.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2021.

OLIVEIRA, E. de. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

OLIVEIRA, L. C. D. de O. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 1994.

OLUFOWOBI, J. et al. **Clay soil stabilisation using powdered glass**. Journal of Engineering Science and Technology, v. 9, n. 5, p. 541–558, 2014. Disponível em: <https://doaj.org/article/6df24ecb182c4dc3956799bd1107212d>. Acesso em: 26 nov. 2021.

OYELAMI, C. A.; VAN ROOY, J. L. **A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective**. Journal of African Earth Sciences, v. 119, p. 226–237, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2016.03.018>.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. de O.; OLIVEIRA, R. A. de. **Controle de qualidade da cal para argamassas - metodologias alternativas**. Revista Ciências & Tecnologia, Recife - PE, p. 1–11, 2007.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimento rodoviários**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, [s. l.], 2015.

PEDARLA, A.; CHITTOORI, S.; PUPPALA, A. **Influence of mineralogy and plasticity index on the stabilization effectiveness of expansive clays**. Transportation Research Record, n. 2212, p. 91–99, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2212-10>.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2004.

PEREIRA, K. L. de A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2012.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2007.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

POURABBAS, M. B.; TOUFIGH, M. M.; TOUFIGH, V. **Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils**. Construction and Building Materials, v. 170, p. 302–313, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>.

PRESA, E. P. 7a sessão técnica: **Solos tropicais, especiais (expansíveis, colapsíveis e dispersivos) e pavimentos**. X COBRAMSEF Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, p. 19, 1994.

PRODANOV, C.; FREITAS, E. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: [s. n.], 2013. E-book. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=zUDsAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=variáveis+independentes+e+de+pendentes+metodologia+científica&ots=dcZ5biyaFJ&sig=nEcrZGXEcDWr4ZyCoFipMPYhN7s#v=onepage&q=variáveis+independentes&f=false>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

PUDELL, P. C. A. **Estudo do comportamento mecânico de solo da Formação Guabirotuba com adição de cal e pó de vidro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

RIBEIRO, A. O. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2015.

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2018.

RODRIGO ANDRÉ KLAMT; MAGNOS BARONI; JAELSON BUDNY; LUCIANO PIVOTO SPECHT. **Utilização de cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades mecânicas de um solo não laterítico**. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/cps/gj-01-0004>.

SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; BERNARDI, J. V. E.; BORGES, M. D. S. **Mapeamento do contorno estrutural do embasamento da bacia sedimentar de Curitiba - PR**. **Boletim Paranaense de Geociencias**, v. n. 45, p. 133–148, 1997. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/65322>.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H. D. **Contribuição à geologia da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. **Boletim Paranaense de Geociencias**, Curitiba-Pr, v. n. 47, p. 124–142, 1999.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2014.

SANTHANAM, G. R.; GOPALAKRISHNAN, K. **Pavement Life-Cycle Sustainability Assessment and Interpretation Using a Novel Qualitative Decision Procedure**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 27, n. 5, p. 544–554, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000228](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000228).

SARGENT, P. **The development of alkaliactivated mixtures for soil stabilisation.** In: **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes.** 1. ed. [S. l.]: Woodhead Publishing Limited, 2015. p. 555–604. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.555>.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. **Studies on concrete containing ground waste glass.** *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91–100, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6).

SHAYAN, A.; XU, A. **Value-added utilisation of waste glass in concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 81–89, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).

SILVA, M. F. da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2007.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais.** 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Rio Grande do Sul, [s. l.], 1994.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B. de; MELFI, A. J. **Intemperismo e formação do solo.** In: TEXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. (org.). *Decifrando a Terra.* 2 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 624.

TRB, T. R. B. **Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, and Construction.** Washington, D.C: Transportation Research Board, 1987.

VILLIBOR, D. F.; NAGOMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; NETO, A. Z. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** 2ª ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos.** Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2010.