

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE ITIRO IKEOKA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA O
MELHORAMENTO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM O
USO DE CAL E CIMENTO**

CURITIBA

2022

HENRIQUE ITIRO IKEOKA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA O
MELHORAMENTO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM O
USO DE CAL E CIMENTO**

**STATISTICAL ANALYSIS OF EXPERIMENTS CONDUCTED FOR THE
IMPROVEMENT OF SOIL FROM GUABIROTUBA'S FORMATION WITH THE
USE OF LIME AND CEMENT**

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

Orientador: Prof^a Dra. Amanda Dalla Rosa
Johann

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos Pereira
Coninck

CURITIBA

2022



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

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

HENRIQUE ITIRO IKEOKA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA O
MELHORAMENTO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM O
USO DE CAL E CIMENTO**

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

Data de aprovação: 14/junho/2022

Maurício Koubay do Amaral
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Narciso Gonçalves da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciene Ferreira Schiavoni Wiczick
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos professores orientadores, Prof. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann e Prof. Dr. Jose Carlos Pereira Coninck, que auxiliaram e instruíram a confecção deste trabalho. A prestação de ajuda de ambos foi um fator crucial para o progresso das ideias apresentadas, com isso, mesmo em tempos difíceis de ensino a distância, foi possível redigir este TCC com fluidez, graças ao apoio fornecido por parte dos orientadores.

RESUMO

A engenharia é uma área voltada para a criação e aprimoramento de processos das mais diversas áreas e finalidades, visando a maior economia possível para obter um resultado desejado. Nesse quesito, a constante demanda pela otimização de metodologias e aplicações práticas traz à tona a aplicação da estatística para a análise e comparação de diferentes métodos com o mesmo objetivo. A correção de solos possibilita a trabalhabilidade adequada dos solos para os serviços de construção, diminuindo riscos e garantindo o bom desempenho das estruturas projetadas para o local. Este trabalho tem o intuito de utilizar a estatística para otimizar a correção do solo a partir do uso de cal e cimento, processo bastante importante e utilizado na engenharia civil, principalmente na construção de estradas e fundações. A diminuição de custos ao longo da linha de construção gerada pela otimização de diferentes setores pode ser aplicada à utilização em larga escala de processos para a estabilização do solo, possibilitando uma economia significativa de materiais e tempo de obra, que condiz com um dos pilares da engenharia moderna: Eficiência. O trabalho conta com ferramentas computacionais e analíticas para a leitura e interpretação de dados, que visam o esclarecimento a respeito de incertezas estatísticas presentes em corpos de prova montados em laboratório. Com isso, cria a possibilidade de melhores conclusões e avanços na área experimental do tratamento de solos. A partir de tentativas de analisar o padrão de comportamento entre experimentos diferentes, foi possível verificar a inviabilidade de aplicar determinados métodos aos dados estudados, e também identificar métodos que podem ser mais efetivos a serem aplicados para obter resultados mais acertivos.

Palavras-chave: anise solo-cal; anise solo-cimento; regress linear; modelo experimental.

ABSTRACT

Engineering is an area dedicated to the creation and improvement of processes in the most diverse areas and purposes, aiming at the greatest possible savings to obtain a desired result. In this regard, a constant demand for the optimization of methodologies and practical applications brings up the application of statistics for the analysis and comparison of different methods with the same objective. Correction of soils enables the adequate workability of the soils for construction services, reducing risks and ensuring the good performance of the structures designed for the location. This work has the purpose of using statistics to optimize soil correction from the use of lime and cement, a very important process used in civil engineering, mainly in the construction of roads and foundations. The reduction in costs throughout the construction process generated by the optimization of different sectors can be applied to the large-scale use of processes for soil stabilization, allows expressive savings in materials and construction time, which is in keeping with one of the pillars of modern engineering: Efficiency. This work utilizes computational and analytical tools to read and to interpret data, focusing on clarifying about statistical uncertainties presented in specimen assembled in laboratory. Henceforth, creating the possibility for better conclusions and advances in the experimental area of soil treatment. From attempts to analyze the pattern of behavior between different experiments, it was possible to verify the impossibility of applying certain methods to the data studied, and also to identify methods that can be more effective to be applied to obtain more accurate results.

Keywords: soil-cal analysis; soil-cement analysis; linear regression; experimental model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da Formação Guabirotuba na Região Metropolitana de Curitiba .	15
Figura 2 – Curva de compactação	17
Figura 3 – Curvas de compactação para diferentes energias de compressão	18
Figura 4 – Trocas catiônicas no solo com cal	21
Figura 5 – Floculação das partículas de solo	21
Figura 6 – Reações com cátions de cálcio	22
Figura 7 – Regressão linear aplicada para gerar uma função a partir de dados observados	23
Figura 8 – Solo coletado por Sales <i>et al.</i>	26
Figura 9 – Curva granulométrica do solo <i>in natura</i> coletado	26
Figura 10 – Corpo de prova moldado	27
Figura 11 – Resistência à compressão simples em MPa de SALES e CAVARSAN	28
Figura 12 – Resistência à compressão simples em MPa de JULIO	28
Figura 13 – Ensaio de compressão simples	28
Figura 14 – Resistência à compressão simples em kPa usando solo-cimento	30
Figura 15 – Resistência à compressão simples em kPa usando solo-cal	30
Figura 16 – Código Imtest	31
Figura 17 – Gráficos das funções regressoras para solo-cimento	31
Figura 18 – Código dos testes de Shapiro-Wilk e Breush-Pagan	32
Figura 19 – Gráficos das funções regressoras para solo-cimento	33
Figura 20 – Gráficos das funções regressoras para solo-cal	33
Figura 21 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade para o modelo solo-cimento	34
Figura 22 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade para o modelo solo-cal	34
Figura 23 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade gaussiano para solo-cimento	35
Figura 24 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade gaussiano para solo-cal	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ATIC	Associação Técnica Da Indústria De Cimento
DOE	Projeto de Experimento, do inglês <i>Design of Experiment</i>
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações iniciais	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.3	Justificativa	12
1.4	Estrutura do trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	SOLOS	14
2.1.1	Formação Guabirota	15
2.1.2	Estabilização de Solos	15
2.1.3	Estabilização Mecânica	17
2.1.4	Estabilização Química	18
2.1.5	Solo-cimento	18
2.1.6	Aplicações do solo-cimento	19
2.1.7	Solo-cal	20
2.1.8	Aplicações da solo-cal	22
2.1.9	Ensaio de resistência à compressão simples	22
2.2	Análise Estatística	23
2.2.1	Regressão Linear	23
2.2.2	ANOVA	24
2.2.3	Variável Dummy	24
2.2.4	Teste de Shapiro-Wilk	24
2.2.5	Teste de Breusch-Pagan	24
2.2.6	Análise Longitudinal	25
2.3	Trabalhos Relacionados	25
2.3.1	Solo	25
2.3.2	Cal	25
2.3.3	Cimento	25
2.3.4	Água	27

2.3.5	Corpos de Prova	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Materiais	29
3.2	Métodos	29
3.3	Programa Utilizado	29
3.3.1	Entrada de Dados	30
3.3.2	Processamento de Dados	31
3.3.3	Validação de Dados	31
3.3.4	Interpretação dos Dados	32
4	RESULTADOS	33
4.1	Funções Regressoras	33
4.2	Testes de Normalidade	34
4.3	Discussões	35
5	CONCLUSÃO	36
5.1	Viabilidade do modelo	36
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a visão geral a respeito do assunto tratado no trabalho.

1.1 Considerações iniciais

A crescente expansão e evolução da engenharia civil -ocasionada pelo elevado grau de crescimento populacional- possibilitou a criação de novas tecnologias para a otimização de vários setores da construção civil, desde obras de pequeno porte a projetos ambiciosos e pioneiros em avanços tecnológicos. Concomitantemente, houve um crescimento na busca por análises mais avançadas e precisas nas mais diversas áreas, justificadas pela necessidade de aumentar a eficiência e alcance do conhecimento disponível, de modo a diminuir custos e ampliar horizontes da metodologia de construção.

O estudo de solos desempenha um papel importante dentro da engenharia civil, visto que envolve o estudo de fundações, taludes e estradas, que servem como a base essencial para as construções. Para que essas bases possam desempenhar seu papel prescrito, o solo deve atender a requisitos do projeto no que se diz respeito ao seu comportamento mecânico e características físicas, formação geológica e umidade.

Em muitos casos, o solo *in natura* não atende a esses requisitos, fazendo-se necessária a intervenção da engenharia para o estudo e correção, adequando o local para a obra projetada.

Diversos métodos são utilizados para o tratamento e viabilização de solos, dentre esses: reforços com resíduos geossintéticos, colunas granulares, drenos verticais e mistura de aglomerantes no solo. Dentre esses, o último é objeto de estudo desta pesquisa. Experimentos estatisticamente projetados contribuem na obtenção dos resultados mais fidedignos, pois interferências externas são melhor controladas. Inúmeros trabalhos em solos remetem aos estudos de Projeto de Experimento, do inglês *Design of Experiment* (DOE), principalmente quando novos materiais são testados na composição do solo para compactação do mesmo (CAVARSAN, 2018).

Ao tratar o solo com aglomerantes, há uma significativa melhora em sua capacidade de suporte, de modo a aumentar sua resistência, como relatado por diversos autores (SALES *et al.*, 2017; CAVARSAN, 2018; JULIO, 2019). Para avaliar a magnitude deste aumento de resistência são necessários vários testes dentro do planejamento experimental.

A metodologia de pesquisa estatística, quando aplicada, diminui erros e imprecisões na reprodução de um planejamento experimental de laboratório para o campo. Como consequência, influencia na diminuição de gastos extras e riscos envolvidos na obra.

1.2 Objetivos

Nesta seção, serão apresentados os objetivos do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a concordância e precisão dos experimentos feitos pelos autores: (SALES *et al.*, 2017; CAVARSAN, 2018; JULIO, 2019).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: Analisar estatisticamente o comportamento apresentado pelo solo na presença de aglomerantes adicionados para sua estabilização. Posteriormente, comparar os diferentes métodos de análise e, com base em seus resultados e imprecisões, observar quais metodologias possuem uma menor propagação de erro e, finalmente, buscar a otimização dos estudos a respeito de dados obtidos em laboratório para aplicação no campo.

1.3 Justificativa

Em meio à crescente necessidade da otimização dos processos construtivos, a otimização da metodologia da pesquisa possibilita o aumento da eficiência desses processos. Na área de solos, muitos testes em laboratório são feitos em busca de soluções para a correção do solo de um determinado local. Em muitos casos, é possível otimizar as propriedades do solo de maneira satisfatória com o uso de aglomerantes como cal e cimento, tal dado é comprovado pelas quatro pesquisas realizadas (SALES *et al.*, 2017; CAVARSAN, 2018; JULIO, 2019) que serão analisadas neste trabalho. Porém, apesar dos dados mostrarem a eficiência do uso desses aglomerantes, a precisão desses dados precisa ser verificada para evitar a propagação de erros e a ocorrência de imprevistos na aplicação destas metodologias no campo.

Uma das justificativas é verificar se o tratamento dado à observação dos resultados obtidos na compactação do solo interfere na decisão do pesquisador. Como exemplo, pode-se avaliar a concordância entre observadores, técnicas ou equipamentos, o coeficiente de kappa é uma técnica adequada, pois avalia a capacidade de reprodutibilidade dos métodos em análise do solo.

Essa técnica estatística, que se enquadra nesse ambiente ao criar uma análise de concordância entre os testes de solo apresentados em obra e/ou laboratório, poderá contribuir para avaliar o quanto as análises estão resultando na mesma decisão entre os pesquisadores. O modelo justifica matematicamente a relação entre os testes, tornando clara a igualdade ou de-

sigualdade entre os resultados para criar uma rede de dados esperados para o campo a partir de dados obtidos em laboratório.

Ao realizar-se uma análise, erros estatísticos da área de cálculo podem interferir na qualidade de um experimento, tornando-os imprecisos ou incoerentes em determinadas situações. Por isso, faz-se necessária uma análise multifatorial a respeito das diferenças nas variáveis presentes no estudo.

Os dados obtidos em laboratório possuem características diferentes dos dados obtidos diretamente do local de projeto, fazendo com que seja necessária uma margem de erro envolvendo fatores que não podem ser controlados em campo, como a umidade e temperatura do ambiente. Para isso, torna-se importante um estudo para atenuação dessa margem de erro, proporcionando uma melhor aplicação das metodologias estudadas em laboratório.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho contará com o referencial teórico para o suporte literário em relação ao comportamento e composição de solos, juntamente com o estudo de técnicas e ferramentas estatísticas que podem ser utilizadas para analisar experimentos feitos em laboratório. Na seção de trabalhos relacionados, serão abordados os trabalhos dos autores anteriormente mencionados (SALES *et al.*, 2017; CAVARSAN, 2018; JULIO, 2019), que forneceram os dados utilizados neste trabalho. A seção de materiais e métodos fornecerá dados a respeito da execução do trabalho, com ênfase em esclarecer o que foi utilizado e como o trabalho foi conduzido, permitindo sua replicabilidade. Em seguida, serão apresentados os resultados e posteriormente a análise dos resultados, possibilitando a conclusão do assunto tratado no trabalho. Por fim, são feitas sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SOLOS

Os solos são materiais originados a partir da deterioração de rochas que sofrem o processo de intemperismo, podendo ele ser o intemperismo físico, que ocorre quando há uma ação mecânica desagregadora (como o vento, água e temperatura) ou intemperismo químico, em que os minerais da rocha são solubilizados por um agente químico (ORTIGÃO, 2007).

Rochas que sofrem mais desintegração física possuem tendências a gerarem solos com características voltadas à solos granulares, enquanto rochas mais expostas à decomposição química tendem a formar solos mais argilosos (CAPUTO, 1988).

Além de partículas sólidas do material de origem da rocha matriz, o solo contém partes gasosas, líquidas e materiais orgânicos. As partículas presentes nesse ambiente, em geral, encontram-se livres para deslocamento, podendo haver uma pequena cimentação entre si, porém com menor grau de ligação se comparados às partículas de uma rocha (PINTO, 2006).

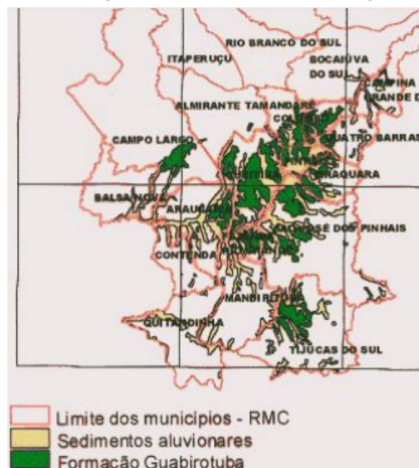
Portanto, o solo, visto do ponto de vista da engenharia civil, pode ser classificado como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas, que é utilizado como material de construção e em fundações estruturais, justificando a importância do estudo do comportamento e propriedades do solo (DAS, 2011).

2.1.1 Formação Guabiro tuba

Situada no Primeiro Planalto Paranaense, a bacia sedimentar de Curitiba abrange Curitiba (PR) e outros municípios circunvizinhos (Almirante Tamandaré, Colombo, Pinhais, São José dos Pinhais, Campina Grande do Sul, Araucária, Quatro Barras e Fazenda Rio Grande) (SALAMUNI, 1998).

A figura 1 representa a presença da Formação Guabiro tuba em Curitiba.

Figura 1 – Distribuição da Formação Guabiro tuba na Região Metropolitana de Curitiba



Fonte: (FELIPE, 2011)

Essa bacia é, em sua maior parte, preenchida pela unidade geológica denominada Formação Guabiro tuba, que é composta por siltes argilosos e argilas siltosas principalmente (SALAMUNI, 1998).

A Formação Guabiro tuba é composta por sedimentos originados de rochas Pré-Cambrianas que alcançam profundidades de 60 a 80 metros, apresentando predominância de argilas e areias arcoseanas (20% a 40% de feldspato). A parte basal é formada por cascalhos e arcósios de granulometria grosseira (FELIPE, 2011).

As camadas presentes nessa formação são pouco espessas (KORMANN, 2002).

2.1.2 Estabilização de Solos

Solos que não atendem os requisitos mínimos para desempenhar a função planejada para um projeto necessitam de uma correção (CRUZ *et al.*, 2010).

Nesse cenário, existem dois fatores principais que determinam a necessidade da estabilização de solos, sendo elas: “1. fraca capacidade de carga ou elevada permeabilidade em solos de fundação [...]”; 2. solos naturais pouco adequáveis à execução de fundações superficiais [...]”. (CRISTELO, 2001).

Ao se julgar um solo como não adequado, a estabilização age como uma alteração das propriedades desse solo para que seu desempenho na engenharia seja melhorado (LAMBE *et al.*, 1991).

Corroborando tal ideia, (VAN IMPE, 1989) sugere a estabilização do solo de acordo com a necessidade da solicitação e ou com o período de duração planejado para a etapa da obra em que se encontra.

Tal estabilização pode ser obtida a partir de cinco principais métodos: estabilização mecânica, estabilização granulométrica, estabilização química, estabilização elétrica e estabilização térmica. (MARQUES, 2006).

Nesse âmbito, (PINTO, 2006) menciona a estabilização de solos como uma área que abrange todos os processos com finalidade de aumentar a resistência e durabilidade de um solo, seja ele de maneira natural ou artificial, para que tragam benefícios para a construção e sua vida útil. Além disso, esses processos também podem modificar outras características -como plasticidade, contração e expansão- de modo benéfico para o projeto designado ao local.

Para que tais processos atuem de forma desejada, é necessário lidar com múltiplos fatores presentes nessa área: granulometria, umidade e compactidade do solo, atrito interno, presença de matéria orgânica (CAPUTO, 1988).

A estabilização pode ser um processo temporário ou permanente, sem ou com a adição de outros elementos (VAN IMPE, 1989). Processos temporários limitam-se a atuar no tempo em que a obra é executada, como em ocasiões em que necessita-se de rebaixamento do lençol freático a partir de drenos ou eletro-osmose (OLIVEIRA, 1994).

Já os processos permanentes podem ser divididos em duas categorias, estabilização permanente sem adição: em que o processo se baseia na utilização de tratamentos térmicos ou de compactação, podendo ser aplicado de maneira superficial, profunda ou com uso de explosivos. E também estabilização permanente com adição: em que ocorre a adição de outro material junto ao solo a ser corrigido, pode-se destacar o emprego de colunas de areia ou brita, injeção de composto estabilizante, utilização de drenos verticais, geossintéticos e tiras metálicas para reforço e também a estabilização com mistura de cal e ou cimento (VAN IMPE, 1989).

A eficiência do processo de estabilização para a melhoria das propriedades do solo está diretamente ligado ao conhecimento antecipado de fatores locais, como as propriedades do solo que devem ser estabilizadas, os ajustes necessários, os custos e prazos existentes no processo, e técnicas de construção envolvidas no projeto. A partir desses dados, é possível avaliar qual o processo de estabilização mais adequado para o solo em questão (OLIVEIRA, 1994).

Como o processo de estabilização de um solo envolve a suplementação mecânica, física e química de um local, a escolha do método a ser utilizado, a partir da vista econômica, se dá pelo estudo dos materiais necessários para atender a suplementação de projeto e a consideração relacionada a custos para material, aplicação e compactação (CORDEIRO, 2007).

2.1.3 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica baseia-se na correção granulométrica do solo, criando uma relação entre a energia de compactação e umidade ótima, de modo a atingir a densificação máxima do solo (SARTORI, 2015).

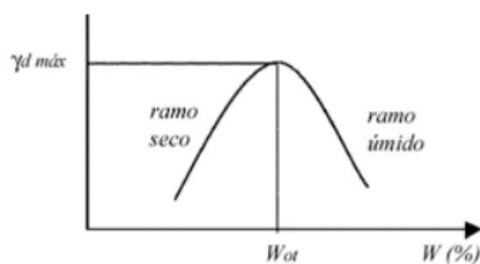
A manipulação granulométrica do solo se dá a partir da compactação do solo, que gera um rearranjo das partículas, atingindo valores ideais de atrito interno e reduzindo o grau de porosidade, que conseqüentemente melhora as características de deformação e ruptura (SOLIZ, 2007).

A compactação para a estabilização mecânica pode ser atingida com o uso de equipamentos como: rolos compactadores, motoniveladoras, caminhões e compactadores manuais (PINTO *et al.*, 2002).

(CRISTELO, 2001), corrobora tal afirmação mencionando a importância do estudo e conhecimento do comportamento mecânico do solo ao manipular-se o índice de vazios presente. Com a redução do índice de vazios, o solo recebe um aumento em sua resistência, além da diminuição de sua deformabilidade e permeabilidade. O autor ressalta a importância de um solo com baixo índice de vazios, visto que a penetração de água e grande índice de deformabilidade podem causar colapso.

Ao realizar o processo de compactação, o peso específico seco do solo tende a aumentar junto com o aumento do teor de umidade. A partir de um determinado teor de umidade, o peso específico tende a diminuir, visto que espaços que antes eram ocupados por partículas sólidas do solo passam a ser preenchidos por água. Com isso, é possível determinar um teor de umidade ótimo para maximizar o peso específico seco (DAS, 2011). Como o representado na figura 2.

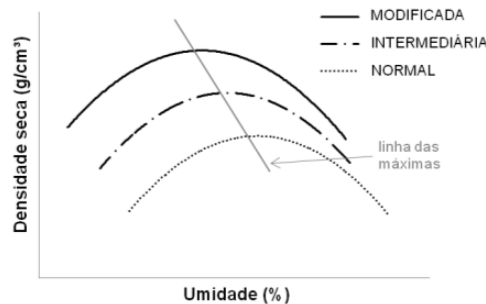
Figura 2 – Curva de compactação



Fonte: (TRINDADE, 2008)

A energia de compactação é diretamente proporcional ao peso específico máximo e inversamente proporcional ao teor de umidade ótimo, ou seja, com maiores valores da energia de compactação, será obtido um maior peso específico máximo e menor teor de umidade ótimo, como mostra a figura 3 (PINTO, 2006).

Figura 3 – Curvas de compactação para diferentes energias de compressão



Fonte: (PINTO, 2006)

2.1.4 Estabilização Química

A estabilização química consiste na adição de produtos ao solo, que, ao reagirem com os grãos ali presentes, geram reações físico-químicas, modificando as propriedades do solo (OLIVEIRA, 1994).

(SILVA, 2016), menciona a existência de diferentes tipos de aditivos químicos utilizados para a estabilização de solos, ressaltando que cada um gera mudanças nas propriedades dos solos de acordo com mecanismos característicos de atuação. O autor destaca quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e cátions, melhoria das ligações entre os agregados das partículas argilosas, floculação e dispersão.

Produtos como: Cimento, cal, pozolana (cinza volante) em conjunto com a cal ou cimento, materiais betuminosos (emulsões asfálticas e alcatrões, comuns nos empregos da engenharia rodoviária), ácido fosfórico, cloretos de cálcio e de sódio e sulfonato de lignina são aditivos químicos que podem ser utilizados para atingirem esse objetivo (SALES *et al.*, 2017).

Em uma matriz descontínua de solo, a estabilização química, diferentemente da estabilização mecânica, age de uma maneira que não preenche totalmente os espaços vazios entre as partículas. A estabilização se dá por alterações físico-químicas que modificam as propriedades da superfície dos grãos, de modo a vedar os poros ou interconectar as partículas, gerando uma cimentação entre grãos (VIZCARRA, 2010).

(SILVA, 2016) enfatiza que, os principais estabilizantes utilizados são o cimento Portland e a cal hidratada.

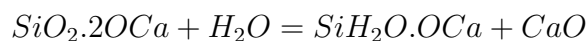
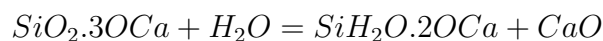
2.1.5 Solo-cimento

O cimento Portland, um dos aditivos estabilizantes mais utilizados, gera uma ligação entre as partículas do solo a partir da hidratação do cimento, criando cristais com a característica de interligarem-se entre si. Com isso, o cimento produz um aumento da resistência do solo, à medida que preenche os vazios entre as partículas, conseqüentemente reduzindo o índice de

vazios. Após o endurecimento do cimento, há o aumento do peso específico do solo, juntamente com a resistência à compressão e cisalhamento (HABIBA, 2017).

A norma Norma Brasileira (NBR) 12023 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) define a mistura solo-cimento como “produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, executada conforme a NBR 12253” (CAVARSAN, 2018).

A mistura denominada cimento Portland é composta por aproximadamente 45% de silicato tricálcico ($SiO_2.3OCa$) e 27% de silicato bicálcico ($SiO_2.2OCa$). Sua adição ao solo gera um processo de hidratação e reações químicas que resultam na formação de silicato hidratado de bi e monocálcio ($SiH_2O.2OCa$ e $SiH_2O.OCa$), substâncias que lentamente cristalizam-se e formam uma matriz envolvente (CRISTELO, 2001) O processo de hidratação libera cal, sendo a reação representada por:



O cimento também pode interagir com outros materiais do solo, como argilominerais presentes no solo. Nesse processo, são gerados produtos de cimentação adicional, com propriedades que aumentam a resistência das ligações entre os grãos de solo e as partículas de cimento (OLIVEIRA, 2000).

A argila presente na reação pode sofrer alterações, de modo a receber uma diminuição em sua plasticidade e expansividade, que (CRISTELO, 2001) cita como um fator benéfico para a maior resistência de um solo.

2.1.6 Aplicações do solo-cimento

Para a aplicação da mistura solo-cimento, deve-se analisar as características do solo que será corrigido, visto que fatores como o tipo de solo, o teor de cimento, o teor de umidade, a compactação e o tempo de cura influenciam no resultado do processo. A estabilização com o uso de cimento é mais vantajosa quando utilizada em solos granulares, siltosos e argilas pouco plásticas, porém, quando aplicada a solos com alto teor de matéria orgânica, não gera resultados adequados. A quantidade utilizada de cimento é diretamente proporcional ao quão argiloso é o solo, e sua aplicação em excesso pode gerar rigidez excessiva e fissuras. Além disso, solos com altos teores de sulfato podem sofrer expansão ou redução da resistência (CRISTELO, 2001).

Não há critérios fixos para determinar a dosagem de cimento nos processos de estabilização de solo-cimento. Associação Técnica Da Indústria De Cimento (ATIC) afirma que a

dosagem de cimento mínima é a quantidade que satisfaz as condições de resistência e durabilidade determinadas em projeto (VITALI, 2008).

O aumento da densidade e redução da porosidade obtidos através de métodos mecânicos como a compactação produzem um aumento na resistência das misturas de solo-cimento. Isso ocorre devido a redução da perda de massa da solo compactado, que, juntamente com a redução da porosidade, aumentam exponencialmente a resistência do solo (VITALI, 2008).

(ENAMORADO, 1990) traz à tona a importância da execução adequada da estabilização em relação ao tempo de cura que ocorre entre o fim da mistura do solo-cimento e o início do processo de compactação. O autor enfatiza que a densidade resultante do processo pode ser comprometida em casos que o processo de hidratação se inicia antes da finalização do processo de compactação, visto que pode prejudicar esse processo.

(CRISTELO, 2001) corrobora tal afirmação ao mencionar a propriedade da mistura solo-cimento de ganhar resistência ao longo dos primeiros dias, exigindo um processo de cura. O tempo de cura ideal é de 7 dias, de acordo com o autor.

2.1.7 Solo-cal

“A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e econômico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactos ambientais” (SILVA, 2016)

A cal é formada por compostos químicos e físicos de origem mineral. Ela é encontrada *in natura* na forma de grãos grandes e porosos, predominantemente na cor branca. Para obtenção da cal virgem, realiza-se um processo de decomposição térmica dos calcários denominado calcinação (GUIMARÃES, 2002).

Segundo a NBR 7175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), a cal hidratada é obtida a partir da hidratação da cal virgem que toma forma de um pó branco constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio.

A estabilização solo-cal é utilizada preferencialmente em solos argilosos e siltosos caulínicos, gerando reações similares aos da mistura com cimento, criando um aumento da rigidez, incremento de trabalhabilidade e redução da expansão (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A cal, quando adicionada ao solo, age em dois tipos de reações químicas diferentes: Ocorrem reações imediatas que reduzem a plasticidade e expansão dos materiais, e reações em longo prazo, aumentando a resistência do solo progressivamente com o decorrer do tempo (SILVA, 2016).

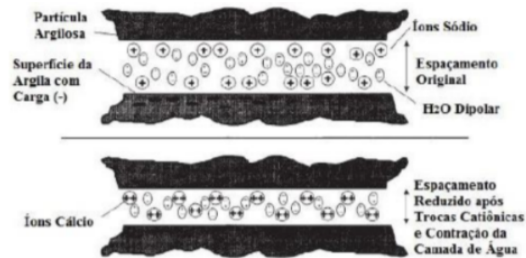
As reações químicas presentes no processo de estabilização solo-cal são classificadas como: trocas catiônicas, floculação, carbonatação e reação pozolânica (CRISTELO, 2001).

Logo após a adição de cal ao solo, as reações químicas imediatas começam com a sua hidratação, gerando uma concentração de cátions de cálcio que tomam o lugar de cátions

metálicos mais fracos. Essa substituição de cátions faz com que a camada de água intersticial sofra uma redução de tamanho, aproximando as partículas de argila (MALLELA *et al.*, 2004).

A figura 4 demonstra a presença das reações químicas no solo.

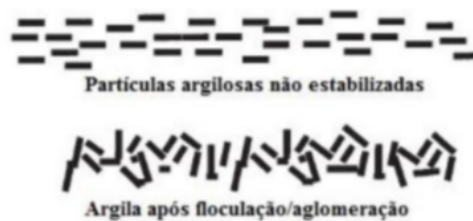
Figura 4 – Trocas catiônicas no solo com cal



Fonte: (SILVA, 2016)

Posteriormente, há a ocorrência de floculação e aglomeração, devido à concentração eletrolítica da água intersticial juntamente com a troca de íons da argila para o formato de cálcio. Esse processo químico faz com que as partículas de argila aglutinam-se em grandes agregados, causando uma mudança na textura do solo, como mostra a figura 5 (MALLELA *et al.*, 2004).

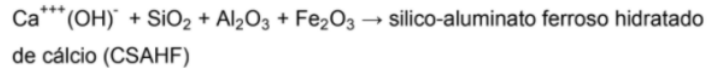
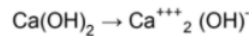
Figura 5 – Floculação das partículas de solo



Fonte: (SILVA, 2016)

Além dos processos anteriores, também ocorre a carbonatação, processo químico em que há a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas bolhas de ar dentre os poros. Essa reação não é benéfica para a estabilização, visto que causa uma expansão de volume do solo (BUENO, 2011).

Por fim, há a ocorrência de reações pozolânicas, que são reações de longo prazo. Nesse processo, o solo adquire resistência mecânica ao longo do tempo, similarmente com a mistura solo-cimento. A cal reage com a presença de sílica, alumina e ferro, formando produtos cimentantes. Essas reações geram produtos como: o silicato hidratado de cálcio, o aluminato hidratado de cálcio e o sílico-aluminato ferroso hidratado de cálcio, como demonstrado na figura 6 (MALLELA *et al.*, 2004; BUENO, 2011)

Figura 6 – Reações com cátions de cálcio

Fonte: (SILVA, 2016)

2.1.8 Aplicações da solo-cal

A estabilização de solos a partir da mistura solo-cal exerce modificações em propriedades físicas e químicas do material. É possível obter melhorias na plasticidade, trabalhabilidade, resistência, tensão-deformação e fadiga a partir da análise e manipulação de fatores como tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura (LOVATO, 2004).

É possível observar que o tempo de espera entre a mistura e a compactação é inversamente proporcional ao peso específico. Portanto, um tempo de espera longo pode ocasionar em problemas no ganho de resistência (OSINUBI, 1998).

Assim como na mistura solo-cimento, a composição química e o tipo de solo possuem influência na resistência final do processo. Para (BUENO, 2011), a utilização de cal cálcica produz resistências maiores a solos, se comparada com a utilização de cal dolomítica.

O tratamento com cal em solos cria uma diminuição nas mudanças volumétricas, devido à floculação resultante das reações químicas da cal. A adição da cal reduz os efeitos de expansão e adensamento do material tratado (CUNHA, 2016).

Existem diversos métodos de dosagem de misturas solo-cal para o cálculo de teores do aditivo para modificação ou estabilização do solo. (LOVATO, 2004) cita os métodos mais utilizados no Brasil como sendo o método do pH, método do ICL, método do Lime Fixation Point e método de Thompson.

2.1.9 Ensaio de resistência à compressão simples

Ensaio de resistência à compressão simples mostram-se frequentes nos trabalhos que estudam a eficácia da estabilização do solo com cimento e cal, por possuir um baixo custo de execução, não exige um longo prazo e produz resultados confiáveis. É notado que uma camada compactada de solo-cimento aplicada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, em muitos casos, sofre ruptura por esforços de tração em sua base. Levando isso em conta, torna-se mais prudente utilizar o ensaio de resistência à tração como uma medida direta da

resistência da mistura. Entretanto, diversos trabalhos demonstram que, em geral, a resistência à tração de solos cimentados varia entre 9% e 14% da resistência à compressão simples. A partir da existência dessa correlação, em conjunto com os aspectos mencionados acima, o RCS se tornou referência na avaliação das variáveis investigadas em misturas solo-cimento e solo-cal (FOPPA, 2005).

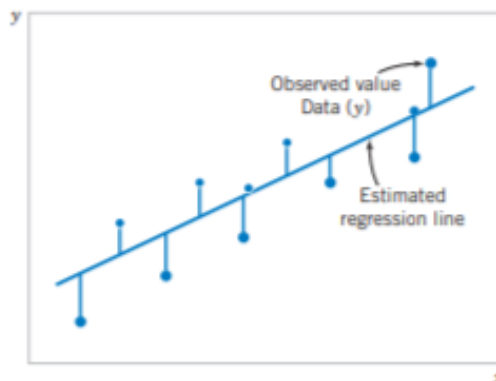
2.2 Análise Estatística

A estatística é uma ciência que auxilia a tomada de decisões e criação de conclusões na presença da variabilidade. Os conceitos da probabilidade e estatística são ferramentas que contribuem para a solução de uma vasta gama de problemas nas mais diversas áreas da engenharia, incluindo solos e rodovias (MONTGOMERY, 2012).

2.2.1 Regressão Linear

A regressão linear é um estudo estatístico que possibilita a criação de projeções para casos reais a partir de dados obtidos em experimentos. A proposta é encontrar um modelo matemático, chamado de regressora, o qual descreve o comportamento dos dados. Sua aplicação não se limita a casos com apenas uma variável, abrangendo estudos multivariáveis e possibilitando uma análise entre os fatores presentes. A partir da utilização de dados experimentais obtidos, utiliza-se uma ferramenta estatística para a criação de uma função representativa para prever o comportamento do material estudado, estimando duas principais variáveis: a inclinação da reta e uma constante. Muito utilizada na engenharia, a técnica agrupa dados fornecidos, como as diferentes resistências do solo em relação ao aditivo acrescentado, e gera uma função que relaciona os dois parâmetros, como exemplificado na figura 7 (MONTGOMERY, 2012).

Figura 7 – Regressão linear aplicada para gerar uma função a partir de dados observados



Fonte: (MONTGOMERY, 2012)

2.2.2 ANOVA

ANOVA se refere a um teste de variância. A partir de múltiplos testes comparativos, são analisados as interações, importância e diferenças entre fatores, sendo assim, é possível concluir sobre a concordância ou discordância entre variáveis, métodos ou experimentos (ROUDER, 2012).

Testes ANOVA são normalmente aplicados a distribuições uniformes e contínuas. Porém também pode ser utilizada em amostras menos balanceadas, com o uso de correções computacionais (SHAW *et al.*, 1993).

2.2.3 Variável Dummy

Variáveis Dummy são variáveis criadas para possibilitar a criação de uma equação que compara a influência de cada fator dentro dos resultados obtidos. Ao serem utilizadas dentro da regressão linear, é possível detectar que variáveis reais possuem mais peso. Com isso, identificar relações entre os métodos e experimentos de diferentes autores em uma mesma área (DRAPER *et al.*, 1998).

2.2.4 Teste de Shapiro-Wilk

O teste de Shapiro-Wilk exerce a função de comprovar a normalidade de uma distribuição, assim validando um experimento que foi feito considerando a normalidade da amostra estudada. Esse teste deve ser utilizado em experimentos em que os objetos de estudo sejam dados desagrupados ou desagregados. Deve ser utilizado junto a outros testes, como o teste de Breusch-Pagan para a validação de um estudo (BRZEZINSKI, 2012).

2.2.5 Teste de Breusch-Pagan

O teste de Breusch-Pagan se encaixa dentro dos modelos de regressão linear buscando conclusões a respeito da influência de diferentes variáveis em um resultado. O teste exclui variáveis separadamente e, com o uso da distribuição chi-quadrado, verifica quais fatores possuem mais influência sobre a variância do resultado obtido, assim apontando possíveis causas de imprecisões e erros. Por não possuir confiabilidade ao ser utilizado sozinho, deve ser aplicado junto a outros testes de validação de experimentos, como o teste de Shapiro-Wilk (HOTHORN *et al.*, 2002).

2.2.6 Análise Longitudinal

Análises longitudinais são eficazes quando o objetivo é avaliar o comportamento de uma população ou experimento que possuem mudanças individuais ou globais ao longo do tempo, ocasionadas pelo tratamento experimental e covariáveis relacionadas ao fator estudado. Portanto, é necessário observar outras variáveis relacionadas à variável principal, de modo a observar o comportamento de um resultado com base nas influências de outros fatores que podem provocar alterações nesse resultado. E, em alguns casos, esse tipo de análise pode ser mais conclusivo do que uma análise transversal, que trabalha com apenas uma variável numérica (DIGGLE, 2002)

2.3 Trabalhos Relacionados

Para a realização deste trabalho, foram utilizados três trabalhos de autores que estudaram o solo da formação Guabirota, sendo eles (SALES *et al.*, 2017; ??; JULIO, 2019). E, portanto, serão apresentados na sequência os materiais utilizados pelos autores para a moldagem dos corpos de prova ensaiados à compressão simples, objeto de análise estatística apresentado nesse trabalho.

2.3.1 Solo

O solo utilizado nos ensaios desses estudos teve a coleta realizada pelos autores em um loteamento situado na Rua Francisco da Conceição Machado, no Bairro Galha Azul, Município de Fazenda Rio Grande – PR, de coordenadas geográficas 25°41'04.6"S e 49°18'29.7"W. O solo é apresentado na figura 8.

Após a coleta, o material passou por ensaios de caracterização por peneiramento e sedimentação, que determinaram a curva granulométrica para o solo natural da Formação Guabirota, representada pela figura 9.

2.3.2 Cal

A cal utilizada foi a cal hidratada, tipo CH-III, regulamentada pela NBR 6473 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

2.3.3 Cimento

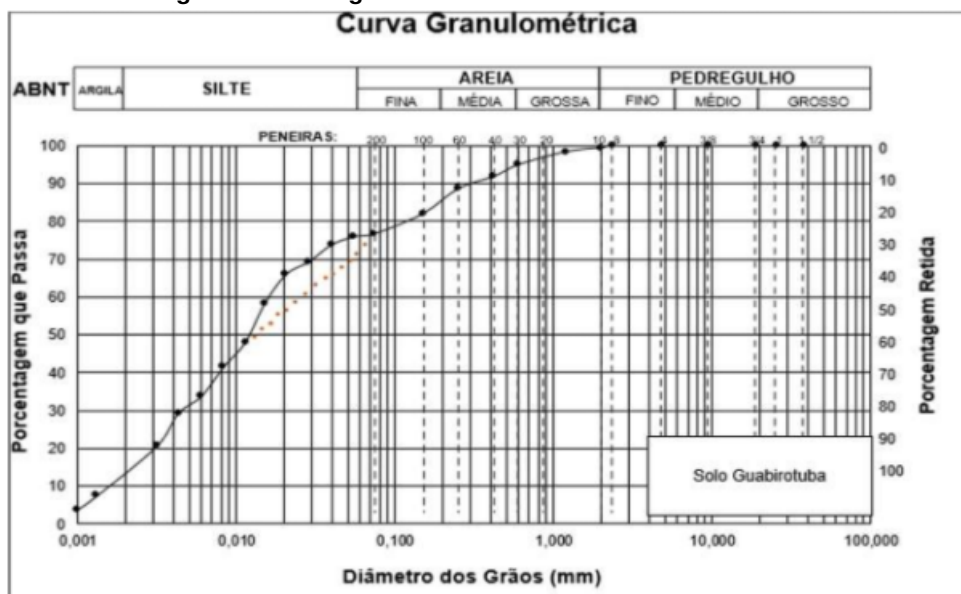
O cimento utilizado foi o Cimento Portland do tipo CPV-ARI, com alta resistência inicial, para a rápida moldagem e ensaios com os corpos de prova.

Figura 8 – Solo coletado por Sales et al.



Fonte: (SALES et al., 2017)

Figura 9 – Curva granulométrica do solo *in natura* coletado



Fonte: (SALES et al., 2017)

2.3.4 Água

Para a realização dos ensaios e para a moldagem dos corpos de prova dos trabalhos mencionados, foi utilizada água destilada, extraída através do processo de destilação da água proveniente da rede pública de abastecimento.

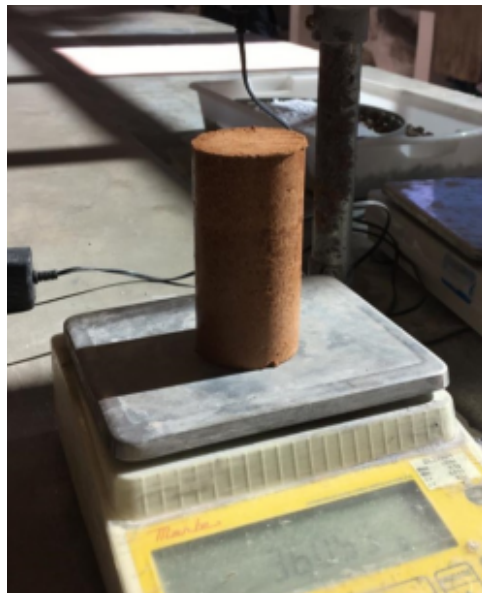
2.3.5 Corpos de Prova

Corpos de prova desolo-cal e solo-cimento foram moldados pelos autores mencionados, fizeram uso do teste de compressão simples de corpos de prova moldados em laboratório com o uso de cal e cimento como aditivos. A moldagem dos corpos de prova foi feita com diferentes dosagens de aditivos: 0%, 3%, 5%, 7% e 9%, e cada autor utilizou, além de amostras com solo natural, uma energia de compactação diferente para a moldagem, sendo eles:

- SALES, 2017: Energia de compactação normal
- CAVARSAN, 2018: Energia de compactação intermediária
- JULIO, 2019: Energia de compactação modificada

Um corpo de prova moldado é representado na figura 10.

Figura 10 – Corpo de prova moldado



Fonte: (JULIO, 2019)

Posteriormente, os corpos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e foi medida a resistência correspondente para cada dosagem e cada energia de compactação, como mostram as tabelas 11, 12.

Figura 11 – Resistência à compressão simples em MPa de SALES e CAVARSAN

	Solo Natural	Solo-cimento				Solo-cal			
		3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%
Normal (Sales et al., 2017)	0,33	0,88	1,53	2,17	2,39	0,47	0,69	0,83	0,97
Intermediária (Cavarsan, 2018)	0,59	1,57	2,29	2,42	2,69	0,90	0,97	1,09	1,11

Fonte: (JULIO, 2019)

Figura 12 – Resistência à compressão simples em MPa de JULIO

Energia	Porcentagem de cimento em relação ao solo				
	0%	3%	5%	7%	9%
Normal	330,0	880,0	1530,0	2170,0	2390,0
Intermediária	590,0	1570,0	2290,0	2420,0	2690,0
Modificada	630,0	1380,0	2140,0	2710,0	2820,0

Fonte: (JULIO, 2019)

A figura 13 apresenta um ensaio de compressão simples.

Figura 13 – Ensaio de compressão simples



Fonte: (JULIO, 2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos referentes à execução do trabalho.

3.1 Materiais

O material utilizado serão os dados obtidos por SALES, 2017; CAVARSAN, 2018; JULIO, 2019, em seus respectivos trabalhos. Valores correspondentes a testes de resistência à compressão de corpos de prova moldados em laboratório por cada um dos autores em diferentes energias de compactação (normal, intermediária e modificada).

3.2 Métodos

A partir dos dados estudados, foi realizada uma análise de correlação entre eles. A metodologia de cada um difere no quesito energia de compactação, portanto o objetivo principal da metodologia aplicada foi verificar o grau de concordância entre os resultados obtidos pelas diferentes energias de compactação.

O cálculo estatístico foi feito a partir do software R, com a utilização do servidor Shiny, que possibilita a visualização do gráfico gerado pelo processo de regressão linear aplicado aos dados obtidos.

O código contou com a leitura de todas as variáveis, obtidas pelos autores, juntamente com sua diferenciação a respeito da energia de compactação utilizada. Após a leitura dos dados, o software pôde calcular a função de regressão linear de cada autor separadamente, seguido da comparação das funções entre si. Com isso, foi possível analisar a covariância e correlação entre cada uma das metodologias utilizadas pelos autores.

A partir da obtenção desses dados e fazendo uso das técnicas de análise de regressão com variáveis Dummy (técnica que refere-se à proximidade dos resultados e à concordância na decisão), foi possível estudar, estatisticamente, se há diferenças entre os ensaios, verificando a viabilidade de um modelo conclusivo para explicar o comportamento dos corpos de prova, de modo a esclarecer qual é o método mais confiável ou mais econômico, caso haja uma discrepância entre a escolha destes.

3.3 Programa Utilizado

O programa teve como foco a criação e comparação de regressores lineares para os valores de resistência obtidos em cada experimento, com o uso de funções e fundamentações teóricas estatísticas.

3.3.1 Entrada de Dados

Primeiramente, foi criado um arquivo CSV a partir de uma planilha contendo os resultados dos testes de resistência à compressão simples executados por SALES *et al.* 2017; CAVASAN, 2018 e JULIO, 2019, relacionando os corpos de prova de cada autor e dosagem a suas respectivas resistências à compressão simples. O procedimento foi feito separadamente para os testes de solo-cal e solo-cimento, e com a utilização de todos os corpos de prova analisados, não somente a média deles, levando em conta a necessidade de uma maior precisão. Os dados estão apresentados nos quadros 14 e 15.

Figura 14 – Resistência à compressão simples em kPa usando solo-cimento

Dosagem	Autor	Resistência	Dosagem	Autor	Resistência	Dosagem	Autor	Resistência
0	SALES	540	0	CARVASAN	700	0	JULIO	620
0	SALES	320	0	CARVASAN	330	0	JULIO	710
0	SALES	360	0	CARVASAN	620	0	JULIO	280
0	SALES	320	0	CARVASAN	540	0	JULIO	550
0	SALES	330	0	CARVASAN	520	0	JULIO	390
0.03	SALES	900	0.03	CARVASAN	1740	0.03	JULIO	1210
0.03	SALES	860	0.03	CARVASAN	1650	0.03	JULIO	1200
0.03	SALES	860	0.03	CARVASAN	1430	0.03	JULIO	1040
0.03	SALES	820	0.03	CARVASAN	1630	0.03	JULIO	960
0.03	SALES	960	0.03	CARVASAN	1410	0.03	JULIO	1140
0.05	SALES	1680	0.05	CARVASAN	2260	0.05	JULIO	1720
0.05	SALES	1490	0.05	CARVASAN	2430	0.05	JULIO	1060
0.05	SALES	1420	0.05	CARVASAN	2420	0.05	JULIO	1760
0.05	SALES	1790	0.05	CARVASAN	2130	0.05	JULIO	1770
0.05	SALES	1290	0.05	CARVASAN	2220	0.05	JULIO	1810
0.07	SALES	2180	0.07	CARVASAN	2270	0.07	JULIO	1730
0.07	SALES	2260	0.07	CARVASAN	2340	0.07	JULIO	2240
0.07	SALES	2150	0.07	CARVASAN	2730	0.07	JULIO	2200
0.07	SALES	2230	0.07	CARVASAN	2280	0.07	JULIO	1910
0.07	SALES	2050	0.07	CARVASAN	2510	0.07	JULIO	2070
0.09	SALES	2690	0.09	CARVASAN	2740	0.09	JULIO	2290
0.09	SALES	2330	0.09	CARVASAN	1800	0.09	JULIO	2410
0.09	SALES	1920	0.09	CARVASAN	2510	0.09	JULIO	2440
0.09	SALES	2210	0.09	CARVASAN	2820	0.09	JULIO	2360
0.09	SALES	2790	0.09	CARVASAN	3410	0.09	JULIO	2060

Fonte: Autores (2019)

Figura 15 – Resistência à compressão simples em kPa usando solo-cal

Dosagem	Autor	Resistência	Dosagem	Autor	Resistência	Dosagem	Autor	Resistência
0	SALES	540	0	CARVASAN	700	0	JULIO	620
0	SALES	320	0	CARVASAN	330	0	JULIO	710
0	SALES	360	0	CARVASAN	620	0	JULIO	280
0	SALES	320	0	CARVASAN	540	0	JULIO	550
0	SALES	330	0	CARVASAN	520	0	JULIO	390
0.03	SALES	550	0.03	CARVASAN	990	0.03	JULIO	570
0.03	SALES	610	0.03	CARVASAN	1150	0.03	JULIO	910
0.03	SALES	390	0.03	CARVASAN	880	0.03	JULIO	860
0.03	SALES	400	0.03	CARVASAN	830	0.03	JULIO	650
0.03	SALES	400	0.03	CARVASAN	880	0.03	JULIO	1030
0.05	SALES	680	0.05	CARVASAN	960	0.05	JULIO	780
0.05	SALES	730	0.05	CARVASAN	710	0.05	JULIO	850
0.05	SALES	620	0.05	CARVASAN	940	0.05	JULIO	1270
0.05	SALES	770	0.05	CARVASAN	1050	0.05	JULIO	1090
0.05	SALES	670	0.05	CARVASAN	930	0.05	JULIO	1280
0.07	SALES	830	0.07	CARVASAN	1080	0.07	JULIO	1700
0.07	SALES	340	0.07	CARVASAN	1050	0.07	JULIO	1450
0.07	SALES	750	0.07	CARVASAN	1160	0.07	JULIO	1220
0.07	SALES	700	0.07	CARVASAN	1130	0.07	JULIO	1350
0.07	SALES	960	0.07	CARVASAN	1040	0.07	JULIO	1540
0.09	SALES	1000	0.09	CARVASAN	1130	0.09	JULIO	1730
0.09	SALES	950	0.09	CARVASAN	1080	0.09	JULIO	1810
0.09	SALES	730	0.09	CARVASAN	1200	0.09	JULIO	1760
0.09	SALES	680	0.09	CARVASAN	1200	0.09	JULIO	1480
0.09	SALES	1230	0.09	CARVASAN	960	0.09	JULIO	1730

Fonte: Autores (2019)

3.3.2 Processamento de Dados

Após a leitura e descompactação dos dados, foi introduzida uma variável Dummy para cada autor, gerando assim um conjunto de vetores para a representação do autor do corpo de prova, assim como a dosagem e resistência. A partir desses vetores, foram realizados testes de regressão e comparação entre autores, a partir da função `lmtest` do software R, resultando em modelos comparativos. A função é mostrada na figura 16.

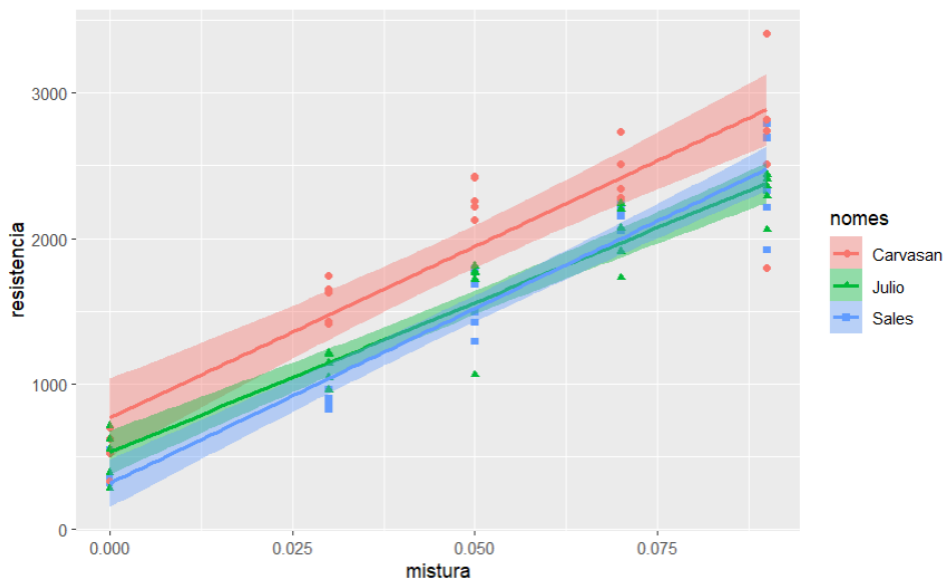
Figura 16 – Código `lmtest`

```
modeloD <- lm(resistencia~ mistura + autor+ mistura * autor)
summary(modeloD)
modeloD$coefficients
plot(modeloD)
anova(modeloD)
```

Fonte: Autoria Própria

Os diferentes modelos criados exercem a função de analisar a concordância entre os experimentos realizados pelos três autores estudados, de modo a identificar se os resultados ocorreram conforme o esperado, de acordo com a literatura sobre estabilização de solos, e se possuem discrepâncias entre si. Um modelo pode ser visualizado na figura 17

Figura 17 – Gráficos das funções regressoras para solo-cimento



Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Validação de Dados

Para a validação das funções regressoras utilizadas para a realização do trabalho, estas foram submetidas aos testes de normalidade, homogeneidade e multicolinearidade. Portanto,

fez-se uso dos testes de Shapiro-Wilk e Breush-Pagan no software R. A figura 18 apresenta as funções utilizadas no programa.

Figura 18 – Código dos testes de Shapiro-Wilk e Breush-Pagan

```
# TESTES DE VALIDACAO
# TESTE DE NORMALIDADE
#####
shapiro.test(modeloD2f$fitted.values) # teste de normalidade dos resíduos Saphiro

# TESTE DE HOMOGENEIDADE
bptest(modeloD2f) # teste da homogeneidade dos resíduos Breush-Pagan
coefTest(modeloD2f, df = Inf)
confint(modeloD2f)
coefci(modeloD2f)
anova(modeloD2f)
```

Fonte: Autoria Própria

3.3.4 Interpretação dos Dados

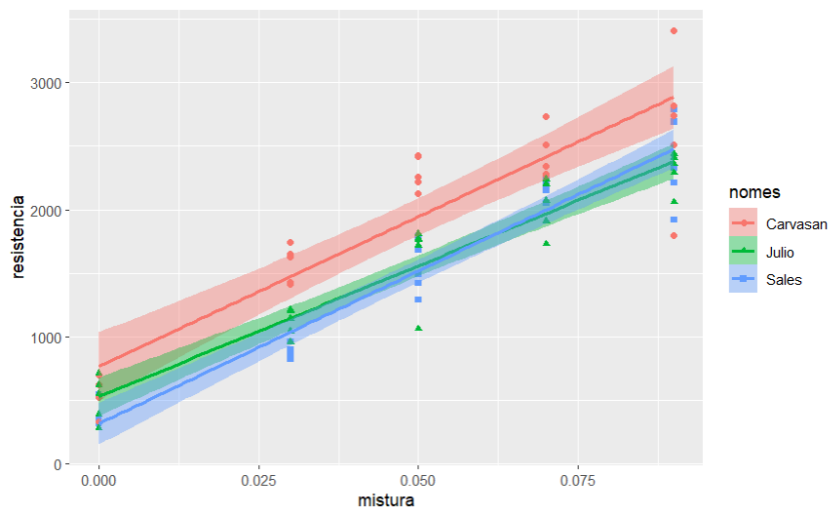
A interpretação dos dados foi feita a partir dos dados de saída do programa utilizado, realizando a leitura de testes de hipótese e tabelas ANOVA para a conclusão a respeito de interações e concordâncias entre os autores e a leitura de gráficos comparativos para a conclusão a respeito da otimização dos experimentos, bem como a identificação de imprecisões, discordâncias com a literatura e suas possíveis causas.

4 RESULTADOS

4.1 Funções Regressoras

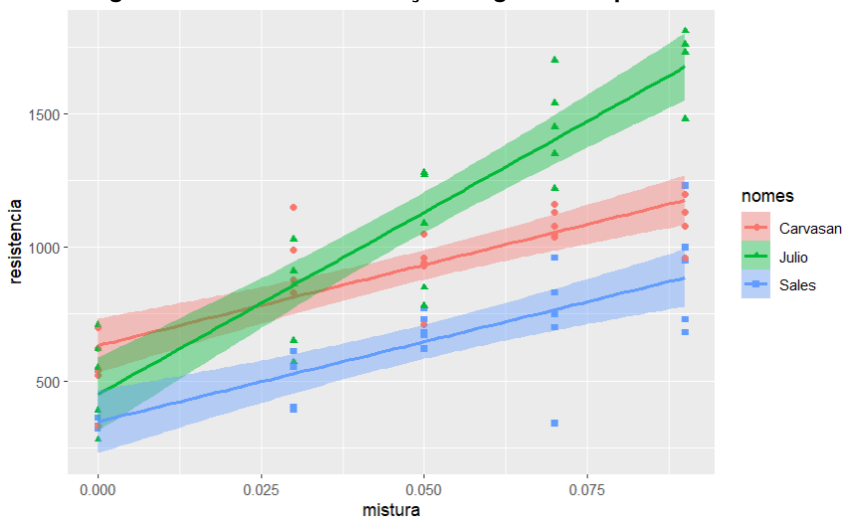
Com a leitura e estudo dos dados de saída obtidos no programa, foi detectada uma grande variação nas resistências de uma mesma dosagem tanto entre autores quanto individualmente dentro de um mesmo experimento, além disso, as funções possuem coeficientes angulares e constantes diversos. Ao comparar os trabalhos dos autores, tanto em experimentos de solo-cimento quanto solo-cal, foram obtidos os seguintes gráficos representados nas figuras 19 e 20:

Figura 19 – Gráficos das funções regressoras para solo-cimento



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Gráficos das funções regressoras para solo-cal



Fonte: Autoria Própria

É possível verificar a influência das diferentes energias de compactação ao verificar a divergência das regressoras representantes de cada autor. Também é possível observar a

diferença entre as resistências do solo não tratado, indicando que, possivelmente, há diferenças entre as energias mesmo sem interações com o tratamento do solo.

Ao estudar o gráfico, também é possível detectar indícios de que os experimentos não foram feitos em mesmas condições de trabalho, ou seja, não seguiram o mesmo planejamento experimental. Visto que, JULIO, 2019, que utilizou a energia de compactação modificada, deveria obter resistências maiores em relação aos outros dois autores tanto em solo-cimento quanto em solo-cal, porém isso só foi observado no experimento de solo-cal.

4.2 Testes de Normalidade

Os testes de normalidade e homogeneidade apontaram a falta de normalidade e distribuição contínua tanto entre os experimentos, e, com exceção do teste de homogeneidade para solo-cal, apontaram um p-valor abaixo de 0,05, indicando que os modelos obtidos não são adequados para gerar um padrão que descreve o comportamento do tratamento com solo-cal e solo-cimento, como é possível observar nas figuras 21 e 22:

Figura 21 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade para o modelo solo-cimento

```
> shapiro.test(modeloD$fitted.values) # teste de normalidade dos residuos

Shapiro-wilk normality test

data: modeloD$fitted.values
W = 0.93995, p-value = 0.001457

> ##### Homogeneidade ###
> bptest(modeloD) # teste da homogeneidade dos residuos Breush-Pagan

studentized Breusch-Pagan test

data: modeloD
BP = 8.7766, df = 3, p-value = 0.03241
```

Fonte: Autoria Própria

Figura 22 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade para o modelo solo-cal

```
> shapiro.test(modeloD2f$fitted.values) # teste de normalidade dos residuos

Shapiro-wilk normality test

data: modeloD2f$fitted.values
W = 0.96461, p-value = 0.03421

> ##### Homogeneidade ###
> bptest(modeloD2f) # teste da homogeneidade dos residuos Breush-Pagan

studentized Breusch-Pagan test

data: modeloD2f
BP = 6.8523, df = 3, p-value = 0.07676
```

Fonte: Autoria Própria

Com isso, fez-se necessária uma tentativa de normalizar o modelo que representa o comportamento dos experimentos. Porém mesmo após a normalização a partir da distribuição Gaussiana, não foi possível adquirir um p-valor acima de 0,05, apontando a inviabilidade de extrair conclusões estatisticamente comprovadas a partir dos experimentos estudados, como é possível observar nas figuras 23 e 24:

Figura 23 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade gaussiano para solo-cimento

```

> shapiro.test(modeloGaussSales$fitted.values) # teste de normalidade dos residuos

Shapiro-wilk normality test

data:  modeloGaussSales$fitted.values
W = 0.88859, p-value = 7.591e-06

> ##### Homogeneidade ###
> bptest(modeloGaussSales) # teste da homogeneidade dos residuos Breush-Pagan

studentized Breusch-Pagan test

data:  modeloGaussSales
BP = 4.3968, df = 1, p-value = 0.03601

```

Fonte: Autoria Própria**Figura 24 – Resultados dos testes de normalidade e homogeneidade gaussiano para solo-cal**

```

> shapiro.test(modeloGaussSales$fitted.values) # teste de normalidade dos residuos

Shapiro-wilk normality test

data:  modeloGaussSales$fitted.values
W = 0.88859, p-value = 7.591e-06

> ##### Homogeneidade ###
> bptest(modeloGaussSales) # teste da homogeneidade dos residuos Breush-Pagan

studentized Breusch-Pagan test

data:  modeloGaussSales
BP = 10.983, df = 1, p-value = 0.0009196

```

Fonte: Autoria Própria

4.3 Discussões

A análise em questão foi feita utilizando todos os autores, dosagens e suas respectivas resistências concomitantemente. Possivelmente, ao criar um modelo que separe em diferentes funções para cada dosagem, ocorreria mais normalidade e homogeneidade na análise, visto que o modelo tenderia a uma amostra normal ao invés de uma curva exponencial, como o observado em resistências dos solos tratamentos com solo-cal e solo-cimento.

5 CONCLUSÃO

5.1 Viabilidade do modelo

A partir dos dados recebidos e estudados, foi possível concluir a respeito da inviabilidade da criação de um modelo regressor comparativo entre os experimentos prévios, levando em conta a insuficiência de normalidade e homogeneidade apresentada nos resultados dos testes.

Portanto, mesmo que visível uma distinção dos gráficos dos diferentes autores, não é possível adquirir conclusões sólidas, com base estatística, a respeito do comportamento das misturas de solo-cal e solo-cimento nas diferentes condições de: energia de compactação, dosagem do aditivo e método experimental.

Uma justificativa plausível em relação a esse ocorrido é a falta de um único método experimental dentre os autores, visto que cada experimento foi conduzido sob diferentes condições de ambiente e tratamento. Mesmo que em diferentes condições de energia de compactação, se executados sob um mesmo planejamento experimental, a geração de um modelo deve ser viável com o uso das variáveis Dummy, ao gerar um ajuste na função regressora.

Também é possível destacar a maior complexidade ao trabalhar com a energia de compactação modificada, que pode ocasionar discrepâncias que comprometem a normalidade de uma distribuição. Levando em conta o apresentado, é provável que os resultados experimentais de JULIO, 2019, tenham interferido na análise computacional de forma a diminuir a precisão e viabilidade da função regressora.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Levando em conta esse possível problema, é possível criar um planejamento experimental a ser utilizado para futuros trabalhos, visando corrigir o erro experimental encontrado ao tentar aproximar trabalhos divergentes entre si.

Uma análise possível de ser efetuada é através da análise longitudinal, que engloba mais de uma variável para gerar um modelo para o caso estudado.

A análise longitudinal pode ser utilizada ao adquirir resultados não conclusivos a partir de análises transversais (análises que se baseiam em apenas uma variável numérica) como foi percebido neste trabalho.

Para isso, seria possível a utilização de diferentes tempos de cura, diferentes temperaturas ou diferentes níveis de umidade ao moldar os corpos de prova.

Ao adicionar mais variáveis ao estudo, se torna possível a análise de covariância (interações entre as variâncias), que pode ajudar a esclarecer pontos não detectados sem ela.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - análise química. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. [S.l.]: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.
- BRZEZINSKI, M. **The Chen–Shapiro Test for Normality**. [S.l.]: Sage Journals, 2012.
- BUENO, E. S. **Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal**. [S.l.]: UFRGS, 2011.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. [S.l.]: Editora LTC, 1988.
- CAVARSAN, M. P. **Análise dos efeitos da adição de cal e de cimento para estabilização de solos**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Trabalho de conclusão de curso.
- CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários**. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- CRISTELO, N. E. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. [S.l.]: Universidade do Minho, 2001.
- CRUZ, M. L. *et al.* **Melhoramento do desempenho de misturas de solo- cimento com recurso activadores de baixo custo**. [S.l.]: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2010.
- CUNHA, G. H. R. I. **Estudo de compressibilidade de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. [S.l.]: Ed. Cengage Learning, 2011.
- DIGGLE, P. J. **Analysis of Longitudinal Data**. [S.l.]: Oxford, 2002.
- DRAPER, N. R. *et al.* **Series in Probability and Statistics**. [S.l.]: New York: Wiley, 1998.
- ENAMORADO, M. A. **Estudo Comparativo entre o Método Mecânico e o Método Físico-Químico para Dosagem do Solo-Cimento**. [S.l.]: COPPE/UFRJ, 1990.
- FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba**. [S.l.]: MINEROPAR, 2011.
- FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. [S.l.]: Pini, 2002.

- HABIBA, A. **A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques**. [S.l.]: International Journal of Transportation Engineering and Technology, 2017.
- HOTHORN, T. *et al.* **Diagnostic Checking in Regression Relationships**. [S.l.]: R News, 2002.
- JULIO, E. B. **Análise do efeito da compactação - energia modificada - em um solo com adição de cal e cimento**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Trabalho de conclusão de curso.
- KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2002.
- LAMBE, T. W. *et al.* **Soil Mechanics**. [S.l.]: New York: J. Wiley, 1991.
- LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- MALLELA *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. [S.l.]: Report Prepared for the National Lime Association, 2004.
- MARQUES, G. L. O. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. [S.l.]: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.
- MONTGOMERY, D. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- OLIVEIRA, J. C. **Caracterização Geotécnica de Materiais Inconsolidados Arenosos do Distrito Federal Utilizados como Material de Construção**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2000.
- OLIVEIRA, L. C. **A Estabilização de Solos Aplicada A Habitação, Um Estudo de Misturas Solo-Cimento**. [S.l.]: COPPE/UFRJ, 1994.
- ORTIGÃO, J. A. R. **Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. [S.l.]: Editora LTC, 2007.
- OSINUBI, K. J. **Permeability of Lime-Treated Lateritic Soil**. [S.l.]: Journal of Transportation Engineering, 1998.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006.
- PINTO, S. *et al.* **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. [S.l.]: Ed. Copiarte, 2002.
- ROUDER, J. N. **Default Bayes factors for ANOVA designs**. [S.l.]: Journal of Mathematical Psychology, 2012.
- SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR)**. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista, 1998.
- SALES, A. W. *et al.* **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Trabalho de conclusão de curso.
- SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- SHAW, R. G. *et al.* **Anova for Unbalanced Data: An Overview**. [S.l.]: Esa Journals, 1993.
- SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2016.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

TRINDADE, T. P. da. **COMPACTAÇÃO DOS SOLOS**. [S.l.]: UFV, 2008.

VAN IMPE, W. F. **Soil improvement techniques and their evolution**. [S.l.]: Ed. Taylor & Francis, 1989.

VITALI, O. P. M. **Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência**. [S.l.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. [S.l.]: PUC Rio, 2010.