

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA PAULA GUILLEN CAVARSAN

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL E DE CIMENTO PARA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

MARIA PAULA GUILLEN CAVARSAN

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL E DE CIMENTO PARA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann.

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos Pereira Coninck.

CURITIBA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL E DE CIMENTO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Por

MARIA PAULA GUILLEN CAVARSAN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no primeiro semestre de 2018, pela seguinte banca de avaliação:

Profa. Orientadora – Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

Prof. Co-Orientador – José Carlos Pereira Coninck, Dr.
UTFPR

Profa. Janine Nicolosi Corrêa, Dra.
UTFPR

Prof. Rogerio Francisco Kuster Puppi, Dr.
UTFPR

*Dedico este trabalho a meus pais,
por serem meus primeiros
e maiores exemplos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha força e consolo, pelo amor incondicional e pela graça abundante. Eu nada sou, mas a Ele toda honra e toda glória.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Prof^a. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann, pela disposição, atenção, paciência e orientação. Sou grata não apenas pelos conhecimentos compartilhados, mas pelo interesse, incentivo e pela postura exemplar que pude observar e aprender. Minha profunda admiração.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. José Carlos Pereira Coninck, pela dedicação indescritível. Serei sempre grata por transformar a minha monitoria de Probabilidade e Estatística em um curso aprofundado na matéria. Obrigada por abrir meus horizontes e despertar em mim o desejo de realizar uma pesquisa onde eu pudesse aplicar parte do que aprendi ali.

Agradeço aos colegas de laboratório, pelos conhecimentos e dicas compartilhadas. Em especial, ao João Luiz, pela sua extrema gentileza e disposição em me auxiliar nos ensaios de laboratório. Agradeço também ao técnico responsável pelo laboratório, Felipe, pelo profissionalismo e disposição para ajudar.

Aos autores Andrei Sales, Daniel Donadi e Kaio Nery por desenvolver um excelente trabalho com ótimos resultados, que serviram para complementar e aprimorar a análise desenvolvida neste trabalho.

Aos amigos que estiveram comigo durante os cinco anos de faculdade, entre alegrias e tristezas. Em especial, agradeço a Isabela e Fernanda, que compartilharam comigo as noites em claro, as preocupações, mas principalmente o sonho. A Sérgio e Laura Helena, agradeço pelo auxílio em laboratório e apoio especial quando eu precisava de uma mão a mais.

Por fim, agradeço àqueles que estiveram comigo em cada passo até aqui. A minha mãe, Cassia, pelo apoio incondicional, palavras de consolo, compreensão imensurável e por ler meu trabalho quantas vezes fosse preciso. A meu pai, Paulo, por sempre me apoiar, incentivar e por compreender as dificuldades. Obrigada a vocês por serem um exemplo de trabalho, esforço e dedicação. A minha irmã, Ana Júlia, pelo carinho e auxílio em incontáveis momentos.

A todos, que de alguma forma, foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho, o meu muito obrigada!

Unfortunately, soils are made by nature and not by man, and the products of nature are always complex.

Infelizmente, solos são feitos pela natureza e não pelo homem, e os produtos da natureza são sempre complexos.

Karl Terzaghi (1883 – 1963)

RESUMO

CAVARSAN, Maria Paula Guillen. **Análise dos efeitos da adição de cal e de cimento para estabilização de solos.** 2018. 91 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O solo é um material originado da deterioração de rochas, através de diversas ações intempéries que ocorrem na natureza. Por esse motivo, os solos apresentam composições distintas e, conseqüentemente, características físicas peculiares em diferentes regiões do planeta. A maior parte das obras da indústria da construção civil, se não todas, terá que lidar em algum momento com o solo local, isto é, com suas características e propriedades. Na maioria das vezes, as propriedades do solo não atendem os requisitos de projeto, fazendo com que se busquem alternativas para solucionar o problema. Assim, é de grande importância realizar o estudo prévio das características do solo com que se trabalha. Por ser uma solução mais econômica e favorável ao meio ambiente, a estabilização de solos é o processo mais utilizado para solucionar o problema. A estabilização pode ser mecânica - compactação, ou química - adição de aditivos químicos, como cimento e cal. A presente pesquisa teve como objetivo analisar os efeitos da energia de compactação e do teor de aditivo na resistência à compressão simples de misturas solo-cimento e solo-cal. Para esta análise foram moldados corpos de prova com teores de 3%, 5%, 7% e 9%, compactados na energia intermediária. Os resultados foram comparados com os dados obtidos por Sales et al. (2017) para os mesmos teores na energia de compactação normal. Foi realizado o ensaio de compactação Proctor intermediário, resultando em massa específica aparente seca máxima de 1,62 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 20,5%. Para todos os corpos de prova, foi observado aumento de resistência entre a energia normal e intermediária e entre teores de aditivo. Comparando com os resultados de Sales et al. (2017), observa-se que para ambas as energias de compactação, o cimento resulta em uma resistência mais alta do que o cal. Também foi desenvolvido um planejamento experimental para análise fatorial 2k dos resultados. Dessa forma, foram considerados dois níveis, mínimo e máximo, para as variáveis. A análise tinha como objetivo ajustar os dados a um modelo para que fosse possível prever o comportamento da mistura. O modelo gerado para o solo-cimento apresentou problemas nos resíduos dos dados, indicando que o ajuste era inviável. Já o solo-cal apresentou um bom ajuste do modelo de segunda ordem encontrado. Foi definida a equação $Y (MPa) = 0,86225 + 0,15317 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) + 0,16825 \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right) - 0,07083 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right)$, onde Y é a resistência à compressão simples, TA o teor de aditivo e EC a massa específica aparente seca máxima equivalente. A equação apresentou resultados compatíveis com os valores encontrados em laboratório, validando o modelo. Assim, a partir da equação, foi gerada uma superfície de resposta para o solo-cal.

Palavras-chave: Solo-cimento. Solo-cal. Resistência à compressão simples. Análise fatorial 2k. Superfície de resposta.

ABSTRACT

CAVARSAN, Maria Paula Guillen. **Analysis of the effects of lime and cement addition on soil stabilization.** 2018. 91 f. Term paper. Graduate in Civil Engineering, Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2018.

Soil is a material originated from the deterioration of rocks, through various intemperate actions that occur in nature. For this reason, the soils present distinct compositions and, consequently, peculiar physical characteristics in different regions of the planet. Most, if not all, of the construction industry will have to deal at some point with the local soil, that is, with its characteristics and properties. Most of the time, the soil properties do not meet the design requirements, causing them to look for alternatives to solve the problem. Thus, it is of great importance to carry out the preliminary study of the soil characteristics. Because it is a more economical and environmentally friendly solution, soil stabilization is the most used process to solve the problem. Stabilization can be mechanical - compaction, or chemical - addition of chemical additives such as cement and lime. The present study aimed to analyze the effects of compaction energy and additive content on the unconfined compressive strength of soil-cement and soil-lime mixtures. For this analysis, some soil samples were molded with contents of 3%, 5%, 7% and 9%, compacted at the intermediate energy. The results were compared to the results of Sales et al. (21017) for the same contents of additives, compacted at the standard energy. The intermediate Proctor results were 1,62 g/cm³ for the maximum dry unit weight and 20,5% for the optimum moisture. The samples compacted on intermediate energy presented a better result than standard energy. Comparing this research results with Sales et al. (2017), it was noted that cement treatment produced higher unconfined compressive strength than lime. An 2k factorial experimental design of the results was also developed. Thus, two levels, minimum and maximum, were considered for the variables. The aim of the analysis was to adjust the data to a model so that it was possible to predict the behavior of the mixture. The model generated for soil-cement presented problems in the data residues, indicating that the adjustment was not feasible. The soil-lime presented a good fit of the second-order model found. The following equation was defined: $Y (MPa) = 0,86225 + 0,15317 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) + 0,16825 \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right) - 0,07083 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right)$, where Y represents the unconfined compressive strength, TA is the additive content and EC is the maximum dry unit weight. The equation presented results compatible with the values found in the laboratory, validating the model. Thus, from the equation, a response surface was generated for soil-lime

Key-words: Soil-cement. Soil-lime. Unconfined compressive strength. 2k factorial analysis. Response surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da Formação Guabirotuba na Região Metropolitana de Curitiba	18
Figura 2 - Curva de compactação	20
Figura 3 - Curvas de compactação para diferentes energias de compressão	21
Figura 4 - Trocas catiônicas no solo com cal	25
Figura 5 - Flocculação das partículas de solo	26
Figura 6 - Exemplo de dados para dois fatores (A e B).....	32
Figura 7 - Combinações dos dados da figura 6.....	32
Figura 8 – Respostas médias dos dados	32
Figura 9 – Efeitos de A.....	33
Figura 10 – Efeitos de B.....	33
Figura 11 – Efeitos de A e B.....	34
Figura 12 - Tabela de sinais	35
Figura 13 – Tabela de Análise de Variância para um modelo de dois fatores	37
Figura 14 - Exemplos de gráfico de interação	39
Figura 15 - Gráficos de verificação de pressupostos	40
Figura 16 - Exemplo de superfície de resposta tridimensional	41
Figura 17 - Curva granulométrica do solo natural	43
Figura 18 - Curva de compactação para solo natural.....	45
Figura 19 - Curva de compactação para solo-cimento.....	45
Figura 20 - Curva de compactação para solo-cal.....	46
Figura 21 – Curvas de compactação para solo natural, normal e intermediária.....	56
Figura 22 – Curvas de compactação para solo-cimento, normal e intermediária.....	57
Figura 23 – Curvas de compactação para solo-cal, normal e intermediária.....	58
Figura 24 – Curvas de compactação normal e intermediária	59
Figura 25 – Comparação resultados solo-cimento	64

Figura 26 – Comparação resultados solo-cal.....	64
Figura 27 – Comparação resultados normal de Sales et al. (2017)	65
Figura 28 – Comparação resultados intermediária.....	65
Figura 29 - Plano DOE 2k para Solo-cimento	66
Figura 30 - Interação entre as variáveis teor de aditivo (A) e energia de compactação (B) para Solo-cimento	67
Figura 31 - Gráficos para validação dos dados Solo-cimento	68
Figura 32 - Transformação BOX-COX	70
Figura 33 - Plano DOE 2k para Solo-cal	71
Figura 34 - Interação entre as variáveis teor de aditivo (A) e energia de compactação (B) para Solo-cal	72
Figura 35 - Gráficos para validação dos dados para Solo-cal.....	73
Figura 36 – Superfície de resposta para Solo-cal	76
Figura 37 – Superfície de resposta para Solo-cal	76
Figura 38 – Curvas de nível para superfície Solo-cal.....	77
Figura 39 - Vetores gradiente da função solo-cal.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Granulométrica do Solo Natural.	43
Tabela 2 – Resumo dos Ensaios LL e LP, e Determinação do IP para Solo-Cal.....	44
Tabela 3 – Resumo dos Ensaios LL e LP, e Determinação do IP para Solo-Cimento.	44
Tabela 4 - Resultados ensaio RCS para o solo natural - EN	46
Tabela 5 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3% - EN	47
Tabela 6 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5% - EN	47
Tabela 7 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7% - EN	47
Tabela 8 - Resultados ensaio RCS pra o solo-cal 9% - EN	47
Tabela 9 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3% - EN.....	48
Tabela 10 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5% - EN.....	48
Tabela 11 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7% - EN.....	48
Tabela 12 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9% - EN.....	48
Tabela 13 – Fatores controláveis para realização dos ensaios.....	50
Tabela 14 – Planejamento experimental para ensaio de Resistência à Compressão Simples	51
Tabela 15 – Planejamento experimental segundo DOE para análise fatorial	51
Tabela 16 – Relação teor de umidade x peso específico aparente seco	52
Tabela 17 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para o solo natural	56
Tabela 18 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo natural.....	56
Tabela 19 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para mistura solo- cimento.....	57
Tabela 20 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo-cimento.....	57
Tabela 21 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para mistura solo- cal.....	58

Tabela 22 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo cal	58
Tabela 23 – Resultados ensaio RCS para o solo natural - EI	61
Tabela 24 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3% - EI	61
Tabela 25 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5% - EI	61
Tabela 26 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7% - EI	62
Tabela 27 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9% - EI	62
Tabela 28 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3% - EI	62
Tabela 29 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5% - EI	62
Tabela 30 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7% - EI	63
Tabela 31 – Resultados ensaio de RCS para o solo-cal 9% - EI	63
Tabela 32 - Resultados médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa.....	63
Tabela 33 - Dados utilizados para a análise do Solo-Cimento	66
Tabela 34 - Dados utilizados para a análise do Solo-Cal.....	71
Tabela 35 - Comparação entre valores obtidos pelo modelo e ensaio.....	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 SOLOS	17
2.1.1 Conceitos gerais.....	17
2.1.2 Formação Guabirota.....	17
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	18
2.2.1 Estabilização mecânica	19
2.2.2 Estabilização química.....	21
2.2.3 Solo-cimento	22
2.2.3.1 Fatores influentes na mistura solo-cimento	23
2.2.3.2 Dosagem de misturas solo-cimento	24
2.2.4 Solo-cal	25
2.2.4.1 Fatores influentes na mistura solo-cal	27
2.2.4.2 Dosagem de misturas solo-cal	27
2.2.5 Aplicações na engenharia civil	28
2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	30
2.3.1 Experimento fatorial 2k.....	31
2.3.1.1 Experimento fatorial 2 ²	31
2.3.1.1.1 Contraste.....	33
2.3.1.1.2 Relação do Efeito e do Contraste.....	35
2.3.1.1.3 Soma dos quadrados	36
2.3.1.1.4 Coeficientes de regressão e efeitos	37
2.3.1.1.5 Interação	38
2.3.1.1.6 Verificação dos pressupostos do modelo	39
2.3.1.2 Superfície de resposta e curvas de nível.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 MATERIAIS	42
3.1.1 Solo	42
3.1.1.1 Massa específica real dos grãos	42
3.1.1.2 Análise granulométrica	42
3.1.1.3 Limites de Atterberg	43

3.1.1.4 Ensaio de compactação	44
3.1.1.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples	46
3.1.3 Cimento	49
3.1.4 Água	49
3.2 MÉTODOS	50
3.2.1 Planejamento Experimental.....	50
3.2.2 Preparação do solo	51
3.2.3 Ensaio de compactação	52
3.2.4 Moldagem dos corpos de prova	54
3.2.5 Ensaio de resistência à compressão simples	55
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	56
4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	56
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	60
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	66
4.3.1 Design para Solo-cimento	66
4.3.1.1 Interação	67
4.3.1.2 Validação do modelo.....	67
4.3.1.3 Resultado para Solo-cimento	70
4.3.2 Design para Solo-cal	71
4.3.2.1 Interação	72
4.3.2.2 Validação do modelo.....	72
4.3.2.3 Resultado para Solo-cal	74
4.3.2.4 Superfície de resposta para Solo-cal.....	76
4.3.2.5 Estudo da função y	77
4.3.2.6 Comparação com os dados obtidos	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.1 CONCLUSÃO.....	82
5.2 SUGESTÕES	84
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material originado da deterioração de rochas, através de diversas ações intempéries que ocorrem na natureza. Por esse motivo, os solos apresentam composições distintas e, conseqüentemente, características físicas peculiares em diferentes regiões do planeta.

A maior parte das obras da indústria da construção civil, se não todas, terá que lidar em algum momento com o solo local, isto é, com suas características e propriedades. Na maioria das vezes, as propriedades do solo não atendem os requisitos de projeto, fazendo com que se busquem alternativas para solucionar o problema. Por esses motivos, é de grande importância realizar o estudo prévio das características do solo com que se trabalha.

Em muitos casos, a solução utilizada envolve a remoção do solo local e substituição por um solo que atenda às necessidades da obra. No entanto, esse tipo de procedimento pode gerar altos impactos econômicos e ambientais. Muitas vezes, este novo solo encontra-se em regiões muito distantes da área de construção. O processo de remoção, extração e locomoção do material gera novos gastos, exige um período maior de tempo para solucionar o problema e, ainda, gera maior degradação ambiental e poluição do ar, devido à forma de extração e de transporte.

Para evitar este tipo de processo, tem-se optado pela estabilização do solo no local. O tipo de estabilização a ser utilizado depende da característica do solo que necessita ser melhorada e do nível desta melhora. Normalmente, os tipos de estabilização mais utilizados são mecânica e química.

A estabilização mecânica trata da compactação do solo e é amplamente utilizada na construção civil, principalmente, em obras de pavimentação. Esse tipo de estabilização visa diminuir o número de vazios do solo, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade. A estabilização mecânica pode ser feita em diferentes graus de intensidade, chamados de energia. Usualmente, consideram-se três tipos de energia: normal, intermediária e modificada.

A estabilização química se resume à adição de aditivos ao solo, visando melhorar algumas características físicas, como sua trabalhabilidade, resistência e porosidade. Esse tipo de estabilização normalmente é associado à estabilização mecânica. Diversos compostos podem ser utilizados como aditivo, como o cimento, a cal, cinza volante, fibras, casca de arroz, entre outros materiais.

O cimento e a cal são os aditivos mais comumente utilizados para a estabilização química dos solos. Por serem materiais de ampla utilização na construção civil, são facilmente encontrados em qualquer região. Esses materiais possuem como principal característica aumentar a resistência do solo. No entanto, seus efeitos e a intensidade dos mesmos serão diferentes para cada tipo de solo.

Normalmente, o cimento apresenta resultados melhores para resistência do que a cal, porém esta apresenta menor custo. Assim, é importante realizar estudos comparativos entre os efeitos desses aditivos, para poder determinar qual material apresentará melhor custo-benefício.

Na região da Bacia de Curitiba, encontra-se a Formação Geológica Guabirota, que abrange a cidade de Curitiba e sua região metropolitana. Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas algumas pesquisas com o objetivo de estudar as características do solo da região e de encontrar métodos de melhoria das suas propriedades. Nesse sentido, este trabalho tem o intuito de analisar os efeitos que o cimento e a cal exercem sobre o solo da Formação Guabirota, de modo a identificar qual o aditivo mais adequado para a estabilização do solo.

Torna-se importante, também, realizar uma análise estatística dos resultados obtidos. O objetivo dessa análise é prever o comportamento do solo para diferentes teores de aditivos e diferentes energias de compactação, a partir de um modelo de regressão. Além disso, é necessário verificar se o modelo encontrado se aproxima dos valores obtidos nos ensaios realizados na pesquisa.

Por tanto, este trabalho apresentará uma análise dos efeitos da estabilização com cimento e cal, nas energias de compactação normal e intermediária, de uma amostra de solo da Formação Guabirota. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e a análise foi feita através do método de análise fatorial 2^k .

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar os efeitos da adição de cimento e de cal e da energia de compactação nos resultados de resistência a compressão simples.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar o planejamento experimental;
- Realizar ensaios de compactação intermediária para o solo natural e para as misturas solo-cal e solo-cimento;
- Realizar os ensaios de resistência à compressão simples na energia de compactação intermediária para o solo natural e para as misturas solo-cimento e solo-cal;
- Comparar os resultados obtidos para a resistência à compressão simples com os resultados de Sales et al. (2017);
- Analisar os dados obtidos a partir do modelo de análise experimental fatorial 2^k ;
- Verificar se o modelo encontrado é válido;
- Encontrar uma equação de regressão associando a energia de compactação e teor de aditivo;
- Gerar uma superfície de resposta para a regressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS

2.1.1 Conceitos gerais

Os solos são materiais que se originam a partir da deterioração de rochas através do processo de intemperismo. Esse processo pode ser classificado como intemperismo químico, quando há solubilização dos minerais de rocha por um agente químico, e intemperismo mecânico, quando há uma ação mecânica desagregadora através de agentes como água, vento e temperatura (ORTIGÃO, 2009).

De acordo com Caputo (1988), os solos podem ser classificados, quanto à sua origem, em três grandes grupos: residuais - que se encontram no local da rocha de origem, apresentando uma transição gradativa do solo para a rocha; sedimentares – que foram transportados do local de formação através de agentes intempéries; de formação orgânica – que se originam essencialmente a partir da decomposição de materiais orgânicos vegetais ou animais.

Das (2011) define o solo, para fins de engenharia, 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”. Segundo o autor, o solo é utilizado na engenharia civil como material de construção em diversos projetos e em fundações estruturais e, por esse motivo, a necessidade de se estudar as propriedades do solo.

2.1.2 Formação Guabirota

O solo objeto de estudo desta pesquisa pertence à Formação Guabirota na Bacia Sedimentar de Curitiba. De acordo com Salamuni (1998), a Bacia de Curitiba compreende uma área aproximada de 3000 km² da cidade de Curitiba e região metropolitana.

A Formação Guabirota é formada por sedimentos originados de rochas Pré-Cambrianas que alcançam profundidades na ordem de 60-80 metros, com predominância de argilas e areias arcólicas (20 – 40% de feldspato). A parte basal é formada por cascalhos e arcósios de granulometria grosseira (FELIPE, 2011).

Segundo Kormann (2002), “a Formação Guabirota caracteriza-se por apresentar camadas relativamente pouco espessas”.

A Figura 1 apresenta a localização da Formação na região metropolitana de Curitiba.

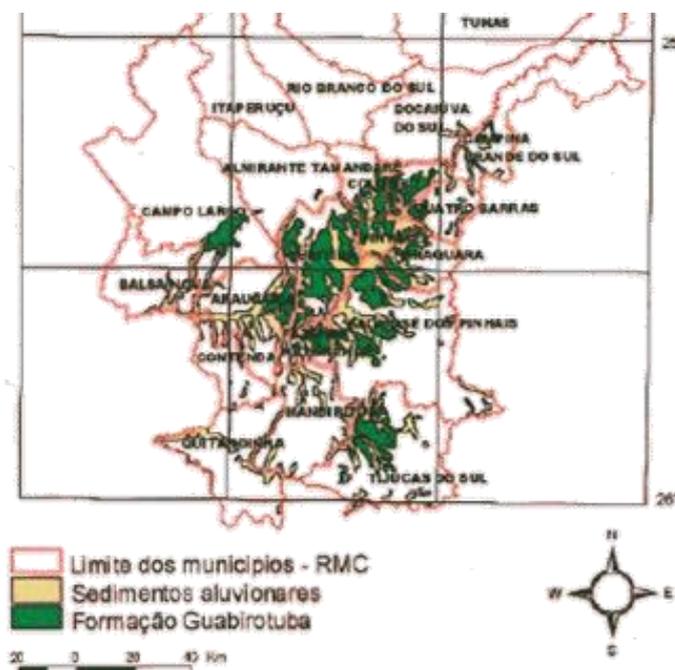


Figura 1 – Distribuição da Formação Guabirota na Região Metropolitana de Curitiba
Fonte: Felipe (2011).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O melhoramento de solos através da estabilização se faz necessário quando o solo natural não atende os requisitos mínimos para desempenhar a função esperada, seja em fundações, escavações ou como material de construção (CRUZ; JALALI, 2010). Para Cristelo (2001), há dois fatores principais que geram a necessidade de estabilização de solos: “1. fraca capacidade de carga ou elevada permeabilidade em solos de fundação [...]; 2. solos naturais pouco adequáveis à execução de fundações superficiais [...]”.

Lambe e Whitman (1969) definem a estabilização como “a alteração de alguma propriedade de um solo para melhorar seu desempenho de engenharia”. De acordo com Marques (2004), os métodos de estabilização podem ser divididos em

cinco tipos: estabilização mecânica, estabilização granulométrica, estabilização química, estabilização elétrica e estabilização térmica.

O alcance de bons resultados no melhoramento das propriedades do solo, através da estabilização, está relacionado ao conhecimento prévio de fatores como as propriedades do solo que demandam estabilização, as melhorias requeridas, os custos e prazos envolvidos no processo, o sistema e técnicas de construção projetadas e os custos de manutenção do projeto. A partir desses dados, é possível analisar qual o processo de estabilização adequado para o solo em questão (OLIVEIRA, 1994).

2.2.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica busca conferir ao solo uma densificação máxima, relacionada a uma energia de compactação e umidade ótima, baseando-se na correção granulométrica do solo. (SARTORI, 2015).

Dentre os processos de densificação, Lambe e Whitman (1969) destacam a compactação em campo com equipamentos mecânicos como o mais usual.

O conceito de compactação é desenvolvido por Caputo (1988).

Entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável. [...]

A compactação de um solo visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas, também, nos aspectos: permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água. (CAPUTO, 1988).

É possível notar a importância da compactação à medida que se compreende a influência do índice de vazios, no comportamento do solo. Quanto menor o índice de vazios, maior é a resistência do solo e menor sua deformabilidade e permeabilidade. Além disso, a penetração de água em solos granulares soltos pode causar liquefação ou, ainda, em solos que apresentem uma estrutura do tipo colmeia, com grande volume de vazios, pode gerar um colapso (CRISTELO, 2001).

Durante o processo de compactação, ocorre o aumento do peso específico seco do solo, conforme há o aumento do teor de umidade. Acima de um determinado teor de umidade, o peso específico começa a sofrer uma redução, pois a água passa

a ocupar os espaços que eram ocupados pelas partículas sólidas. Sendo assim, pode-se determinar um teor de umidade ótimo que define o peso específico seco máximo (DAS, 2011). Esse comportamento é representado graficamente pela curva de compactação, conforme ilustrado na Figura 2.

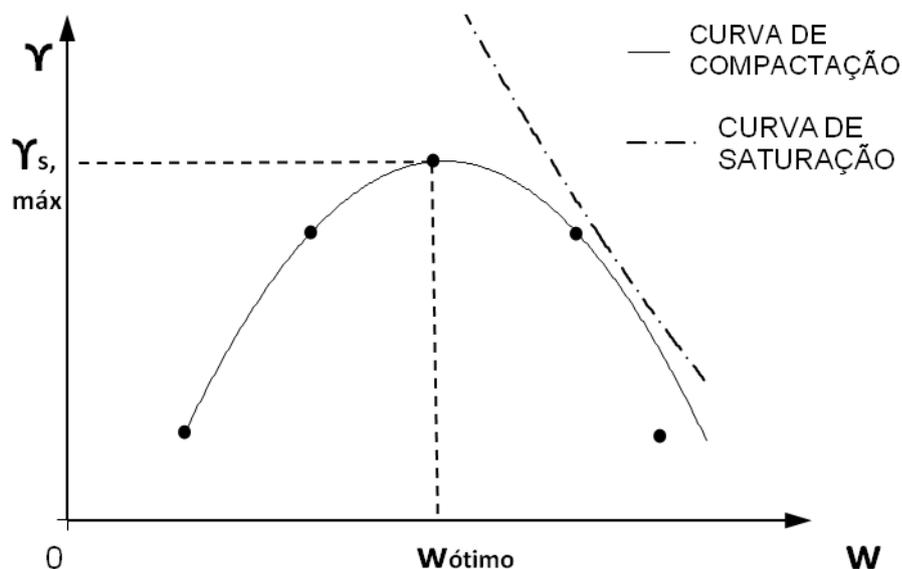


Figura 2 - Curva de compactação
Fonte: Adaptado de Caputo (1988).

Segundo Das (2011), a compactação em campo é normalmente executada por rolos compactadores podendo ser: liso, de pneus de borracha, de pé de carneiro ou vibratório. O autor destaca que, no campo, há fatores, como espessura da camada, intensidade da pressão aplicada pelo equipamento e área de aplicação, que também devem ser levados em consideração, além do teor de umidade e tipo de solo. O peso específico seco, obtido ao final da compactação, também está relacionado ao número de passagens do rolo sobre o solo.

De acordo com Pinto (2006), quanto maior a energia de compactação, maior o peso específico máximo e menor o teor de umidade ótimo, conforme ilustrado pela Figura 3.

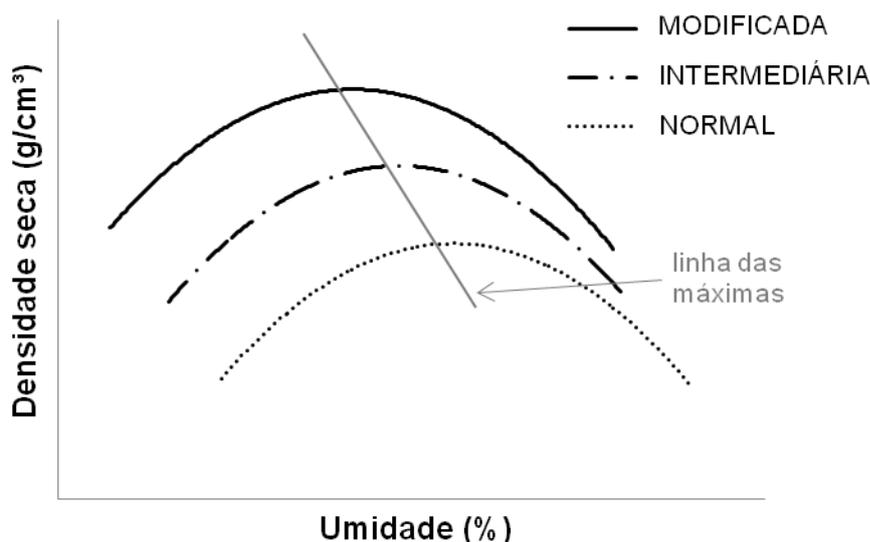


Figura 3 - Curvas de compactação para diferentes energias de compressão
 Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

2.2.2 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de produtos químicos ao solo, gerando reações físico-químicas que levam à modificação de propriedades do solo. Essa técnica tem como objetivos principais conferir ao solo acréscimos de rigidez, melhorar a trabalhabilidade e reduzir a expansão. A função desse método é fazer com que o solo atenda às propriedades de engenharia que o solo natural não é capaz de satisfazer, ou ainda, quando a estabilização mecânica é insuficiente (NUNEZ, 1991; OLIVEIRA, 1994; SILVA, 2016).

De acordo com Silva (2016), há diversos tipos de aditivos químicos utilizados para estabilização de solos, sendo que cada um gera as mudanças nas propriedades dos solos de acordo com mecanismos peculiares de ação. O autor destaca quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e cátions, melhoria das ligações entre os agregados das partículas argilosas, floculação e dispersão.

Para Goularte e Pedreira (2009), os materiais mais utilizados para estabilização química são o cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos e resinas. Silva (2016) destaca que, dentre diversos materiais, os principais estabilizantes utilizados são o cimento Portland e a cal hidratada.

2.2.3 Solo-cimento

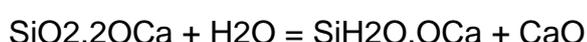
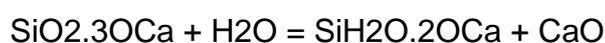
A estabilização através do método solo-cimento consiste na ligação das partículas do solo, causada pela hidratação das partículas de cimento que geram cristais capazes de interligar-se entre si, resultando em uma alta resistência a compressão. Conforme o cimento penetra o solo, ocorre o preenchimento de vazios entre as partículas, reduzindo o índice de vazios. Além disso, após o endurecimento do cimento, o peso específico do solo aumenta, assim como sua resistência ao cisalhamento e à capacidade de carga (HABIBA, 2017).

A norma NBR 12023 (ABNT, 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”.

A natureza química do processo de cimentação fica claro quando Limprasert (1995) destaca:

Quando o solo-cimento é compactado, ligações químicas se desenvolvem entre a superfície de grãos de cimento adjacentes e a interface de partículas de solo. Em solos finos siltosos e argilosos, a hidratação do cimento gera fortes ligações entre o mineral e os agregados para formar uma estrutura do tipo favo de mel na qual as partículas do solo não podem mais deslizar entre si. O cimento não apenas destrói a plasticidade do solo, mas também aumenta a resistência ao cisalhamento e reduz a capacidade de retenção de água de solos argilosos. Por causa dessas propriedades do cimento, há a prevenção do solo não apenas de expansão e amolecimento por absorção de umidade, mas também de congelamento e efeitos de degelo. (LIMPRASERT, 1995).

De acordo com Cristelo (2001), o cimento Portland normal é constituído por cerca de 45% de silicato tricálcico ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{OCa}$) e 27% de silicato bicálcico ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{OCa}$). No processo de hidratação com o solo, forma-se um gel de silicato hidratado de bi e monocálcio ($\text{SiH}_2\text{O} \cdot 2\text{OCa}$ e $\text{SiH}_2\text{O} \cdot \text{OCa}$) que se cristaliza muito lentamente, formando uma matriz envolvente. Durante a reação de hidratação é liberada certa quantidade de cal. A reação pode ser representada da seguinte forma:



Além da reação comum de hidratação, o cimento pode também reagir com os argilominerais presente no solo, conforme descreve Oliveira (2011), “o cimento hidratado reage quimicamente com os argilominerais, gerando produtos de cimentação adicional que aumentam a resistência das ligações entre os grãos de solo e as partículas de cimento”. O autor destaca também que a argila presente na reação pode sofrer mudanças tornando-se menos plástica e expansiva.

2.2.3.1 Fatores influentes na mistura solo-cimento

Há diversos fatores que influenciam as propriedades físico-químicas do solo-cimento, como o tipo de solo, o teor de cimento, o teor de umidade, a compactação e o tempo de cura.

A natureza do solo afeta diretamente as propriedades do solo estabilizado com cimento. A mistura solo-cimento é mais vantajosa quando utilizada em solos granulares, siltosos e argilas pouco plásticas, não sendo adequada a solos que possuam alto teor de matéria orgânica. Quanto mais argiloso o solo, mais cimento é necessário. Solos com altos teores de sulfato podem sofrer expansão ou redução da resistência (LIMPRASERT, 1995; CRISTELO, 2001).

De acordo com Cristelo (2001), a resistência do solo está diretamente ligada ao teor de cimento. Quanto mais elevada a quantidade de cimento, maior a resistência. No entanto, não apenas por motivos econômicos, a adição de cimento além da quantidade necessária, principalmente quando aplicado a pavimentações, não é adequada. O excesso de cimento pode resultar em um material extramente rígido e gerar fissuras, como exemplifica Sales et al. (2017): “a combinação solo e cimento causa uma retração volumétrica da massa e, conseqüentemente, fissuração da capa de rolagem apoiada a essa massa”.

O teor de água ideal varia de acordo com o tipo de solo. Para solos siltosos e argilosos, o teor de água que resulta em maior resistência e durabilidade é igual ou ligeiramente superior (entre 1% e 2%) à umidade ótima de compactação. Já para solos arenosos, deve ser utilizado um teor igual ou levemente abaixo do ótimo (CRISTELO, 2001; VITALI, 2008).

Os efeitos causados pela compactação, como aumento da densidade e redução da porosidade, resultam em um aumento da resistência nas misturas solo-

cimento. A maior densidade da mistura compactada resulta em menores perdas de massa, especialmente em solos siltosos e argilosos, e em um aumento exponencial da resistência. A redução da porosidade também resulta em um aumento exponencial da resistência à compressão (VITALI, 2008).

Outro fator importante para obtenção do melhor resultado possível na estabilização com cimento, consiste no tempo de cura, ou seja, no intervalo de tempo entre o fim da mistura do solo-cimento e o início do processo de compactação. Caso o processo de hidratação inicie antes da finalização do processo de compactação, dificultando esse processo, a densidade final projetada pode ser comprometida (ENAMORADO, 1990).

Segundo Cristelo (2001), assim como acontece com o concreto, o solo-cimento necessita de um tempo de cura antes de exercer suas funções de projeto. O tempo de cura usual é de 7 dias, sendo que, tal como o concreto, a mistura solo-cimento continua ganhando resistência conforme avança em idade.

2.2.3.2 Dosagem de misturas solo-cimento

Não há critérios fixos determinados para a dosagem de cimento nas misturas solo-cimento. A Associação Técnica Da Indústria De Cimento (ATIC) define que a dosagem de cimento deve atender a quantidade mínima do aglomerante, que satisfaça às condições de resistência e durabilidade exigidas em projeto (VITALI, 2008).

No geral, moldam-se diversos corpos de prova com diferentes teores de cimento e, a partir dos resultados, é feita uma interpolação para encontrar o teor ideal (SALES et al., 2017). No Brasil, há a norma NBR 12253 (ABNT, 2016) que define a dosagem da mistura solo-cimento para emprego em camadas de pavimento.

2.2.4 Solo-cal

A adição de cal no solo é uma das técnicas mais antigas de estabilização de solos, sendo extremamente vantajosa por ser economicamente mais viável que outros métodos. Esse método é altamente difundido pelo Brasil e mundo, possuindo várias pesquisas que apresentam bons resultados quanto sua eficiência e durabilidade (LOPES JUNIOR, 2007; HABIBA, 2017).

De acordo com Silva (2016), quando a cal é misturada ao solo, ocorrem diversas reações químicas que geram alterações imediatas, enquanto demais reações ocorrem mais lentamente. Rosa et al. (2011) cita Nóbrega (1985) ao descrever os efeitos dessa reações no solo: “há dois tipos de reações [...]: uma imediata, que reduz a plasticidade e a expansão dos materiais e, outra em longo prazo, gerando um aumento progressivo na capacidade de suporte do solo”.

As reações químicas que ocorrem entre o solo e a cal podem ser classificadas como: trocas catiônicas, floculação, carbonatação e reação pozolânica (lenta) (CRISTELO, 2001).

Com a adição de cal ao solo, e sua conseqüente reação com a água, surge uma concentração de cátions Ca^{++} que substituem os cátions metálicos mais fracos do solo. A troca dos cátions causa uma redução no tamanho da camada de água intersticial, fazendo com que as partículas de argila se aproximem (MALLELA et al., 2004), conforme ilustrado pela Figura 4.

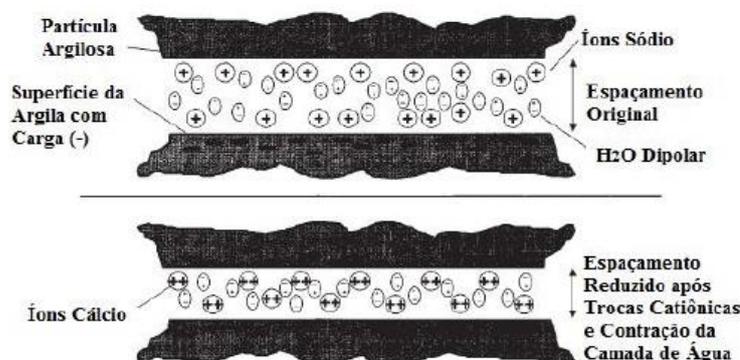


Figura 4 - Trocas catiônicas no solo com cal
Fonte: Silva (2016).

Em seguida, ocorre a floculação e aglomeração. Esses fenômenos são causados pela concentração eletrolítica da água intersticial e pela troca de íons da argila para o formato de cálcio. A floculação e aglomeração produz uma mudança

aparente na textura do solo, já que ocorre a aglutinação de partículas de argila transformando-as em grandes agredados (MALLELA et al., 2004; BUENO, 2011; SILVA, 2016).

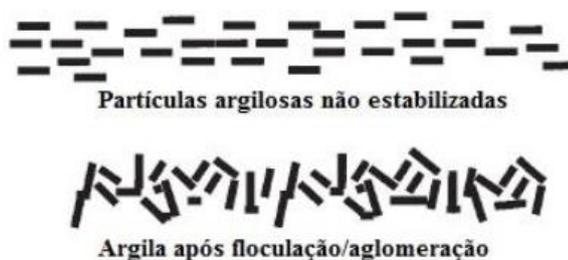
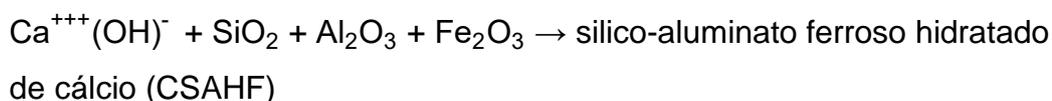
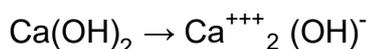


Figura 5 - Flocculação das partículas de solo
Fonte: Silva (2016).

Outra reação que pode ocorrer na mistura solo-cal é a carbonatação. Segundo Bueno (2011), “a carbonatação é a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução”. O autor ainda destaca que essa reação é indesejável, pois resulta em uma expansão de volume do solo.

As reações pozolânicas são reações de longo prazo e, por isso, são responsáveis pelo aumento contínuo da resistência mecânica da mistura solo-cal. Esse aumento ocorre pois as fontes de sílica, alumina e ferro do solo, reagem com a cal e água gerando produtos cimentantes. As reações têm como produto o silicato hidratado de cálcio, o aluminato hidratado de cálcio e o silico-aluminato ferroso hidratado de cálcio, conforme equações abaixo (MALLELA et al., 2004; BUENO, 2011).



Segundo Mallela et al. (2004), as propriedades e características do solo que influenciam na reação solo-cal são PH do solo, índice de orgânicos, drenagem natural,

sódio em excesso, mineralogia argilosa, nível de desagregação, presença de carbonatos, ferro extraível, razão sílica-alumina.

2.2.4.1 Fatores influentes na mistura solo-cal

A estabilização de solos com cal oferece modificações em algumas propriedades físicas do material. Em conformidade com alguns fatores, como tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura, é possível alcançar melhorias na plasticidade, trabalhabilidade, resistência, tensão-deformação e fadiga (LOVATO, 2004).

De acordo com Cunha (2016), diversos autores observaram uma diminuição do peso específico aparente máximo, conforme se adiciona cal na mistura. O autor destaca que foi constatado por Osinubi (2008) que quanto maior o tempo de espera entre a mistura e a compactação, menor é o peso específico, gerando problemas no ganho de resistência.

Para Bueno (2011), a composição química e o tipo de solo podem influenciar na resistência à compressão simples final. O autor verificou que solos misturados com cal cálcica apresentam resistências maiores do que solos misturados com cal dolomítica.

O tratamento com cal em solos faz com que exista 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).

2.2.4.2 Dosagem de misturas solo-cal

De acordo com Lovato (2004), existem diversos métodos de dosagem de misturas solo-cal que estabelecem teores do aditivo para modificação ou estabilização do solo. O autor destaca os métodos mais utilizados no Brasil como sendo o método do pH, método do ICL, método do Lime Fixation Point e método de Thompson.

2.2.5 Aplicações na engenharia civil

De acordo com Cristelo (2001), “a principal aplicação da estabilização de solos sempre foi na execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases e camadas de desgaste de estradas e aeródromos”. O autor ressalta que a experiência em estabilização para pavimentação pode ser útil para outros tipos de obras, como pequenas barragens de terra.

Cunha (2016) ressalta também a importância da estabilização para fundações, “para que a fundação desempenhe sua função é necessário que o solo, onde este elemento construtivo está assentado, possua capacidade de suporte adequada, estabilidade volumétrica e durabilidade”.

Diversos estudos têm sido feitos no intuito de propor melhorias e mudanças na estabilização de solos, para fins da construção civil. Grande parte das pesquisas atém-se às misturas solo-cal e solo-cimento, mas há também considerável número de estudos que adicionam a essas misturas outros aditivos, como cinza volante, fibras e casca de arroz. Dalla Rosa (2009), Consoli et al. (2012), Consoli et al. (2013), Behak (2015) e Freire e Milani (2006) são alguns autores que estudaram os efeitos da utilização de tais aditivos alternativos.

Análises comparativas entre os efeitos de misturas solo-cal e solo-cimento para diferentes tipos de solo têm surgido ao longo dos anos. Holmgreen et al. (1987) realizaram um estudo dos efeitos de cimento e de cal para diferentes solos argilosos, analisando os resultados para os Limites de Atterberg e para a Resistência à Compressão Simples. Os autores concluíram que para os solos argilosos altamente plásticos, a estabilização com cal resultou numa maior resistência à compressão. Enquanto, para os solos areno-argilosos com baixa plasticidade, o tratamento com cimento apresentou maior resistência à compressão.

Em um estudo mais recente, Carvalho et al. (2012) analisaram a trabalhabilidade, resistência à compressão simples e CBR, de misturas solo-cimento e solo-cal, para um solo laterítico. Ambos aditivos apresentaram aumento de resistência e melhora da trabalhabilidade, sendo o cimento o que obteve melhores respostas.

O solo da Formação Guabirotuba tem sido objeto de estudo de diversas pesquisas similares às anteriormente citadas, como em Rissardi (2016), Santo e Sganzerla (2009) e Sales et al. (2017). Este trabalho, por sua vez, visa contribuir com

os dados disponíveis dessa região, aprimorando as informações trazidas pelos pesquisadores aludidos anteriormente.

2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A experimentação científica desempenha um papel extremamente importante para a engenharia, especialmente no desenvolvimento de novos produtos, desenvolvimento de processos de manufatura e melhoramento de processos. Montgomery (2001) define experimento como “um teste ou uma série de testes no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, para que se possa observar e identificar os motivos para mudanças que possam ser observadas no resultado final”.

Nos processos experimentais, a maneira que são coletados os dados causa grande influência nos resultados e conclusões finais. Por esse motivo, o planejamento do experimento é essencial. Ao executar o planejamento, faz-se o estudo das variáveis mais influentes para o processo, analisando a importância de cada uma de suas interações. A partir desse planejamento, é possível otimizar o experimento e alcançar resultados mais significativos para a hipótese criada (MONTGOMERY, 2001; HESS et al., 2003).

Outro fator importante para os experimentos científicos é a validação da análise dos resultados através da estatística. Para Hess et al. (2003), “a estatística é a ciência da resolução de problemas na presença de variabilidade”. Os autores ainda destacam que a estatística é uma disciplina científica, demandando o mesmo nível de rigor e aderência de princípios fundamentais, assim como a física e química.

Hess et al. (2003) definem três características gerais do planejamento estatístico e da análise de experimentos:

- Considerações estatísticas devem ser incluídas na fase de planejamento de todos os experimentos. Deve-se considerar a natureza dos dados a serem coletados, inclusive quais medidas devem ser feitas, a variação provável a ser encontrada e quais fatores podem influenciar na variação das medidas;
- Deve-se selecionar um desenho estatístico que tenha controle da variação das fontes conhecidas. O projeto deve permitir a estimativa da magnitude das variáveis incontroláveis e a modelagem das relações entre as medidas de interesse e os fatores que influenciam essas medidas;

- A análise estatística dos resultados experimentais deve permitir inferências das relações entre os fatores de projeto e as medidas obtidas. Esta análise deve basear-se tanto no desenho estatístico como no modelo usado para relacionar as medidas com as fontes de variação.

Para Montgomery (2001), os métodos de planejamento experimental tem um papel importante em projetos de engenharia, nos quais novos produtos são desenvolvidos ou melhorados. O autor destaca algumas aplicações à engenharia, como: avaliação e comparação de configurações básicas de projeto, avaliação de materiais alternativos, seleção de parâmetros de projeto para que o produto seja resistente a diferentes condições em campo e determinação de parâmetros chave de design que impactam o desempenho do produto.

2.3.1 Experimento fatorial 2^k

Os experimentos científicos são realizados para investigar os efeitos de um ou mais fatores no resultado final. Quando um experimento possui dois ou mais fatores, esses fatores podem influenciar o resultado separadamente ou em conjunto. O experimento fatorial 2^k trata de experimentos com um número k de fatores, tendo cada um apenas dois níveis, chamados de “baixo (-)” e “alto (+)” (MONTGOMERY, 2011; HESS et al., 2003).

2.3.1.1 Experimento fatorial 2^2

O primeiro tipo de fatorial 2^k é o com dois fatores, chamado de 2^2 . Esse modelo analisa dois fatores A e B e a interação AB entre eles. Ambos os fatores possuem 2 níveis – o baixo e o alto. A Figura 6 apresenta um exemplo de dados com três réplicas.

Fator		Combinação	Réplicas			Total
A	B		I	II	III	
-	-	A baixo, B baixo	Q_{11}	Q_{21}	Q_{31}	Q_{1T}
+	-	A alto, B baixo	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}	Q_{2T}
-	+	A baixo, B alto	Q_{31}	Q_{32}	Q_{33}	Q_{3T}
+	+	A alto, B alto	Q_{41}	Q_{42}	Q_{43}	Q_{4T}

Figura 6 - Exemplo de dados para dois fatores (A e B)
 Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

O exemplo da Figura 6, pode ser representado por um quadrado de lado Fator A com níveis (-,+), e lado Fator B com níveis (-,+). Por convenção, o nível mais baixo é representado por (baixo,baixo) $\equiv (-,-) \rightarrow (1)$ e os demais por (baixo,alto) $\equiv a$, (alto,baixo) $\equiv b$ e (alto,alto) $\equiv ab$, todos por relação quadrática, conforme representado pela Figura 7.

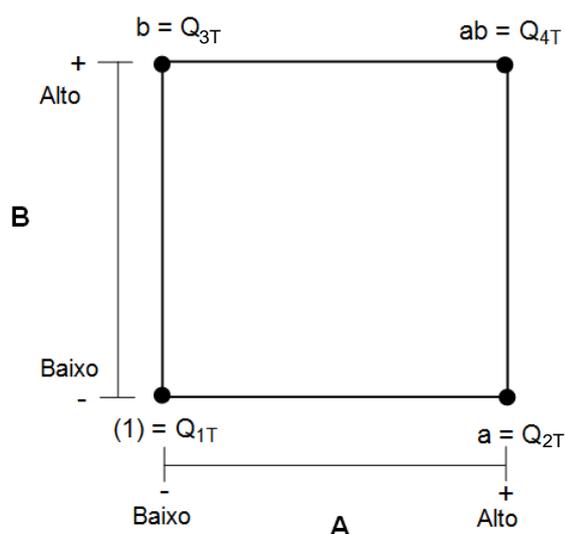


Figura 7 - Combinações dos dados da figura 6
 Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

B	A		média (\bar{y}_B)
	b	ab	$\frac{b+ab}{2n}$
-1	ab	$\frac{(1)+a}{2n}$	
média (\bar{y}_A)	$\frac{b+(1)}{2n}$	$\frac{ab+a}{2n}$	

Figura 8 - Respostas médias dos dados
 Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

2.3.1.1.1 Contraste

A diferença entre as respostas médias de ambos os níveis de um mesmo fator é definida por EFEITO PRINCIPAL. O efeito principal de A é dado pela Equação (1).

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \quad (1)$$

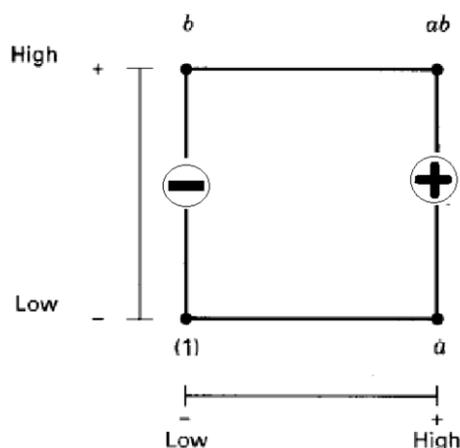


Figura 9 – Efeitos de A
Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

O efeito principal de B é dado pela Equação (2).

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} = \frac{b+ab}{2n} - \frac{(1)+a}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (2)$$

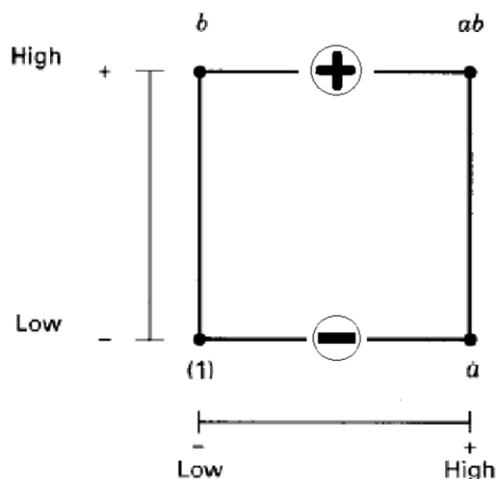


Figura 10 – Efeitos de B
Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

O efeito cruzado AB é chamado EFEITO DE INTERAÇÃO e dado pela Equação (3).

$$AB = \bar{y}_{AB^+} - \bar{y}_{AB^-} = \frac{(1)+ab}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (3)$$

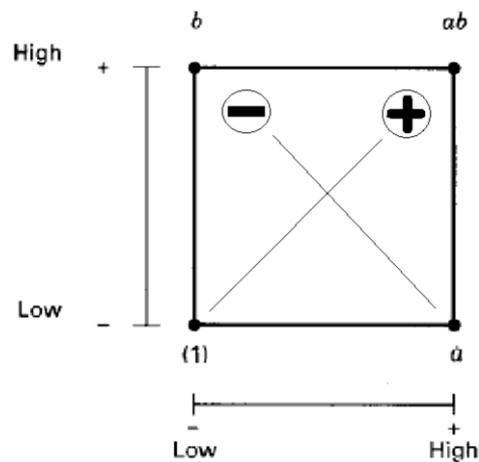


Figura 11 – Efeitos de A e B
Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

Qualquer função linear da forma $\omega = \sum_{i=1}^k c_i \mu_i$, onde $\sum_{i=1}^k c_i = 0$, é chamada de comparação ou contraste nas médias dos tratamentos. Para o caso em estudo os contrastes encontrados são:

- Contraste A: $ab + a - b - (1)$
- Contraste B: $ab - a + b - (1)$
- Contraste AB: $ab - a - b + (1)$

Para melhor alocar o experimento, pode-se gerar uma tabela de sinais para que sejam encontradas as relações entre os sinais dos fatores através da Figura 7. Observe que a coluna identidade I é formada apenas pelo sinal "+", enquanto a interação AB é o produto dos sinais entre os fatores A e B, conforme Figura 12. É fácil verificar a propriedade $\sum_{i=1}^k c_i = 0$ para qualquer linha referente aos elementos dos sinais.

Elementos	Efeito do Fator			
	I	A	B	AB
-1	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

Figura 12 - Tabela de sinais
Fonte: Autoria própria.

2.3.1.1.2 Relação do Efeito e do Contraste

Existe uma relação direta entre o efeito e o contraste que pode ser verificada através da razão entre o contraste e $2^{k-1}(n)$, representada na Equação (4).

$$Efeito = \frac{contraste}{2^{k-1}(n)} \quad (4)$$

Supondo a variância da i-ésima rodada

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (5)$$

pode-se obter a variância estimada para todos os 2^k fatores, nesse caso será dado pela Equação (6).

$$S^2 = \frac{1}{2^{k(n-1)}} \sum_{i=1}^{2^k} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (6)$$

Portanto, a variância do efeito pode ser calculada via a variância do contraste, conforme Equações (7) e (8).

$$Var(Efeito) = Var\left(\frac{contraste}{2^{k-1}(n)}\right) \quad (7)$$

Como cada contraste é uma combinação linear de 2^k tratamentos em n-réplicas tem-se que a variância do contraste é um função de $n2^{k-2}$, no qual dependerá do tamanho da amostra n.

$$Var(contraste) = n2^k \sigma^2 \quad (8)$$

sendo finalmente encontrada a variância do contraste, conforme Equação (9).

$$Var(Efeito) = \frac{1}{n2^{k-2}} n2^k \sigma^2 \quad (9)$$

estimada pela Equação (10).

$$\text{Var}(\text{Efeito}) = \frac{1}{n2^{k-2}} S^2 \quad (10)$$

2.3.1.1.3 Soma dos quadrados

Suponha a variável aleatória normal $W = \sum_{i=1}^k c_i \bar{Y}_i$ e a sua variabilidade dada por $\sigma_W^2 = \sigma^2 \sum_{i=1}^k \frac{c_i^2}{n_i}$. A estatística de teste é dada pela distribuição F-Senedecor, tal que a soma dos quadrados do contraste se apresenta conforme Equação (11).

$$SS_W = \frac{(\sum_{i=1}^k c_i \bar{Y}_i)^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^k \frac{c_i^2}{n_i}} = \frac{[\text{contraste}]^2}{2^k(n)} \quad (11)$$

Para o caso fatorial 2^k com $Y_{1..} = b + (1), Y_{2..} = ab + a, c_1 = -1$ e $c_2 = 1$ podemos encontrar a soma dos quadrados para os contrastes pelas Equações (12), (13) e (14).

$$SS_A = SS_{WA} = \frac{(\sum_{i=1}^2 c_i \bar{Y}_i)^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^2 \frac{c_i^2}{n_i}} = \frac{[ab+a-b-(1)]^2}{2^2(n)} \quad (12)$$

$$SS_B = SS_{WB} = \frac{(\sum_{i=1}^2 c_i \bar{Y}_i)^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^2 \frac{c_i^2}{n_i}} = \frac{[ab+b-a-(1)]^2}{2^2(n)} \quad (13)$$

$$SS_{AB} = SS_{WAB} = \frac{(\sum_{i=1}^2 c_i \bar{Y}_i)^2}{\sigma^2 \sum_{i=1}^2 \frac{c_i^2}{n_i}} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{2^2(n)} \quad (14)$$

e, para soma dos quadrados totais, tem-se a Equação (15):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n y_{ijl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (15)$$

Tal que a projeção da soma é, conforme Equação (16):

$$SST = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (16)$$

A Figura 13 apresenta a tabela para análise de variância.

Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Erro	SS_E	$ab(n-1)$	MS_E	
Total	SS_T	$abn-1$		

Figura 13 – Tabela de Análise de Variância para um modelo de dois fatores
Fonte: Adaptado de Montgomery (2001).

2.3.1.1.4 Coeficientes de regressão e efeitos

Para encontrar os coeficientes de \mathbf{b} para o modelo regressivo $\mathbf{y}=\mathbf{Xb}$ deve-se usar o operador \mathbf{C} , representado pela Equação (17).

$$\mathbf{C} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \quad (17)$$

Sendo \mathbf{X} a variável independente. A matriz dos coeficientes da regressora será encontrada pela aplicação da matriz \mathbf{C} no produto $\mathbf{X}'\mathbf{y}$, conforme Equação (18).

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{C}(\mathbf{X}'\mathbf{y}) \quad (18)$$

Esse produto matricial contém algumas informações importantes:

1. Matriz \mathbf{C} pode ser interpretada como $\mathbf{C} = \frac{1}{2^{k(n)}}$
2. Produto $\mathbf{X}'\mathbf{y}$ gera a matriz dos contrastes em conformidade com a matriz de sinais (19).

$$\mathbf{X}'\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \text{Contraste (1)} \\ \text{Contraste A} \\ \text{Contraste ABC ... N} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Procedendo com o produto de ambas as matrizes pode-se relacionar os coeficientes da regressora com os contrastes de interesse.

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{C}(\mathbf{X}'\mathbf{y}) = \frac{1}{2^{k(n)}} \begin{bmatrix} \text{Contraste (1)} \\ \text{Contraste A} \\ \text{Contraste ABC ... N} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{\text{Contraste (1)}}{2^{k-1}(n)} \\ \frac{\text{Contraste A}}{2^{k-1}(n)} \\ \frac{\text{Contraste ABC...N}}{2^{k-1}(n)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Isto é, os coeficientes de regressão β_i são considerados como sendo a taxa média na resposta por unidade mudada de x_i . Ou seja, os coeficientes da regressora podem ser encontrados pela metade dos efeitos, conforme matriz (21).

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{C}(\mathbf{X}'\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \text{Efeito (1)} \\ \text{Efeito A} \\ \text{Efeito ABC ... N} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Portanto, o produto $\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{C}(\mathbf{X}'\mathbf{y})$ fornece os coeficientes β_i da regressora usando apenas os efeitos. Forma-se, então, a regressora, representada pela Equação (22).

$$y(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (22)$$

As variáveis x_1 e x_2 são chamadas de variáveis *coded* (ou codificada), sendo que seus valores estão em função dos limites -1 e +1. Assim, relacionando as variáveis com os valores originais, pode-se obter uma variável em função do valor de X e de Y, apresentadas nas Equações (23) e (24).

$$x_1 = \frac{X - \left(\frac{X_{\text{alto}} + X_{\text{baixo}}}{2}\right)}{\left(\frac{X_{\text{alto}} - X_{\text{baixo}}}{2}\right)} \quad (23)$$

$$x_2 = \frac{Y - \left(\frac{Y_{\text{alto}} + Y_{\text{baixo}}}{2}\right)}{\left(\frac{Y_{\text{alto}} - Y_{\text{baixo}}}{2}\right)} \quad (24)$$

2.3.1.1.5 Interação

Para verificar o efeito de interação AB, traça-se um gráfico conforme ilustrado na Figura 14. Se as retas forem paralelas, não há interação entre as variáveis A e B. Quando as retas se cruzam, indicam que existe interação.

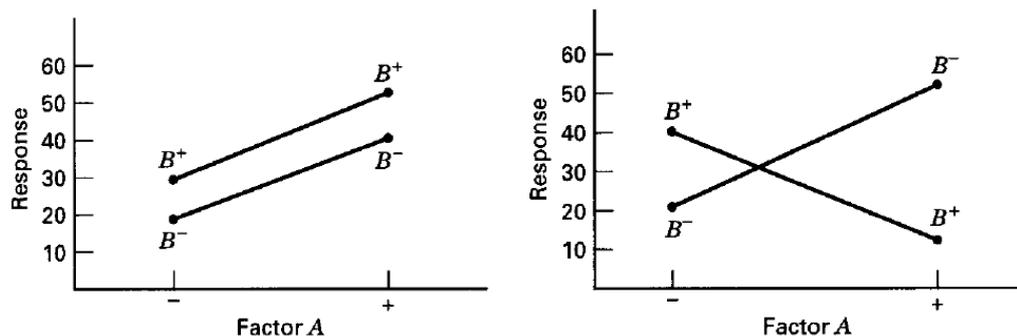


Figura 14 - Exemplos de gráfico de interação
Fonte: Montgomery (2001).

2.3.1.1.6 Verificação dos pressupostos do modelo

Para a aceitação do modelo, o erro de ajuste segue uma distribuição normal $\epsilon \sim N(0,1)$, então o valor esperado do resíduo deverá também seguir a mesma distribuição, cujo valor estimador estatístico é não viesado para $E(res) = \epsilon$. Dessa forma, o resíduo (estimador de erro) corresponderá a Equação (25):

$$res \sim N(0, \sigma_{\epsilon}^2) \quad (25)$$

Isso implica na exigência da homocedasticidade dos dados, ou seja, os resíduos devem apresentar a mesma variância σ_{ϵ}^2 em todo o experimento. Além disso, deve seguir uma distribuição normal. A Figura 15 apresenta os gráficos utilizados para verificar os parâmetros citados. No primeiro gráfico, verifica-se a homocedasticidade, enquanto no segundo, é possível verificar a normalidade.

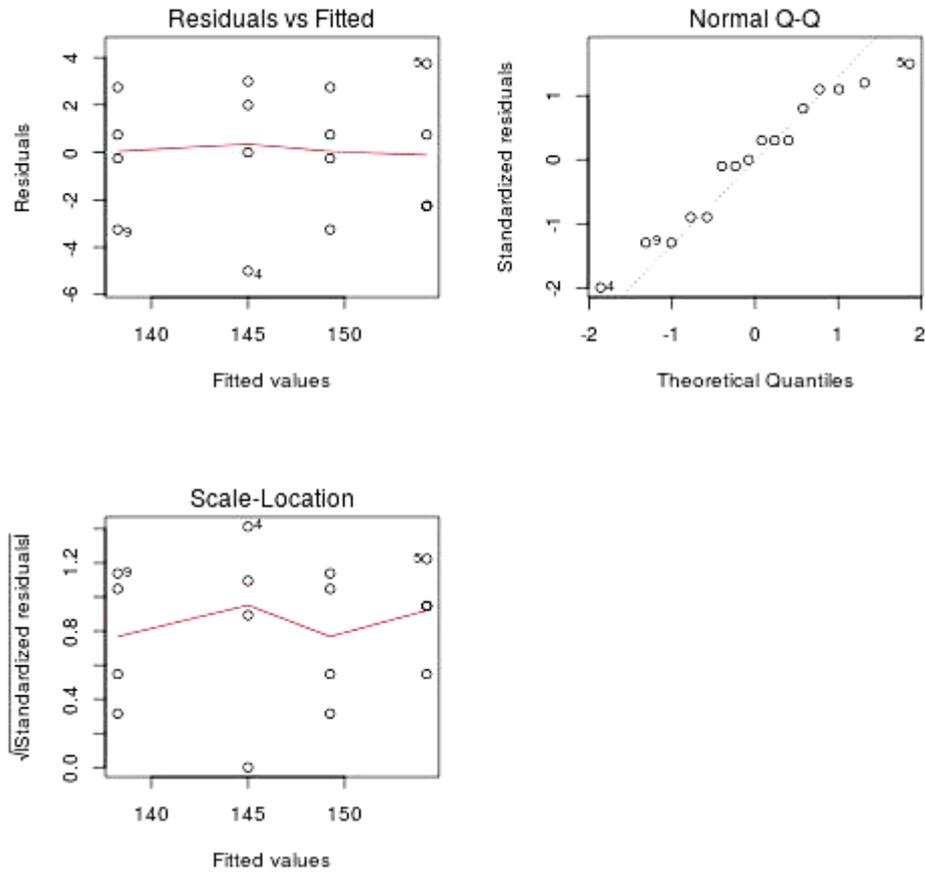


Figura 15 - Gráficos de verificação de pressupostos
Fonte: Montgomery (2001).

2.3.1.2 Superfície de resposta e curvas de nível

De acordo com Montgomery (2001), há a possibilidade de ajustar uma curva de resposta, a partir do modelo de regressão, nos níveis de um fator quantitativo, fazendo com que o experimento tenha uma equação que relaciona o resultado ao fator. O autor ressalta que essa equação pode ser usada para interpolação, ou seja, para prever o resultado em níveis de fatores entre aqueles realmente utilizados no experimento. Quando pelo menos dois fatores são quantitativos, é possível ajustar uma superfície de resposta para prever $y(x_1, x_2)$ em várias combinações dos fatores.

A Figura 16 ilustra um exemplo de superfície de resposta.

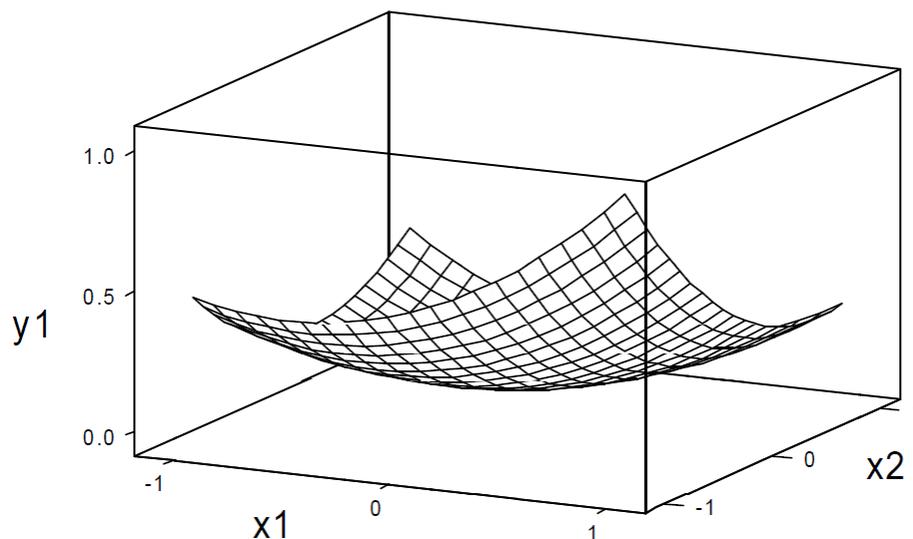


Figura 16 - Exemplo de superfície de resposta tridimensional
Fonte: Oehlert (2010).

O modelo de análise fatorial 2^2 permite que seja feita uma análise entre dois fatores significativos para o resultado final, sendo possível observar os efeitos de cada fator e da interação entre os dois. Com isso, pode-se analisar qual fator possui maior influência sobre o resultado. Além disso, gerada a superfície de resposta, tornam-se visível graficamente as tendências de crescimento da curva. Assim, é possível prever resultados a partir de diferentes combinações de fatores. Por esses motivos, optou-se por utilizar esse método de análise nesta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para as misturas solo-cimento e solo-cal, foram utilizados os mesmos materiais do estudo de Sales et al. (2017), para que fosse possível comparar os resultados obtidos.

3.1.1 Solo

O solo objeto de estudo foi coletado por Sales et al. (2017) e tem origem em um loteamento condomínio na Rua Francisco da Conceição Machado, bairro Galha Azul, Fazenda Rio Grande – PR. De acordo com os autores, o solo foi coletado há cerca de 1,5 metros de profundidade com auxílio de uma escavadeira.

Sales et al. (2017) realizaram diversos ensaios para caracterização do solo. Os resultados obtidos pelos autores que são relevantes para esta pesquisa estão apresentados a seguir.

3.1.1.1 Massa específica real dos grãos

A massa específica real dos grãos obtida foi de 2,751 g/cm³.

3.1.1.2 Análise granulométrica

A partir de ensaios de análise granulométrica, os autores obtiveram a curva granulométrica, conforme a Figura 17, e foram capazes de determinar a composição granulométrica, conforme a Tabela 1.

Curva Granulométrica

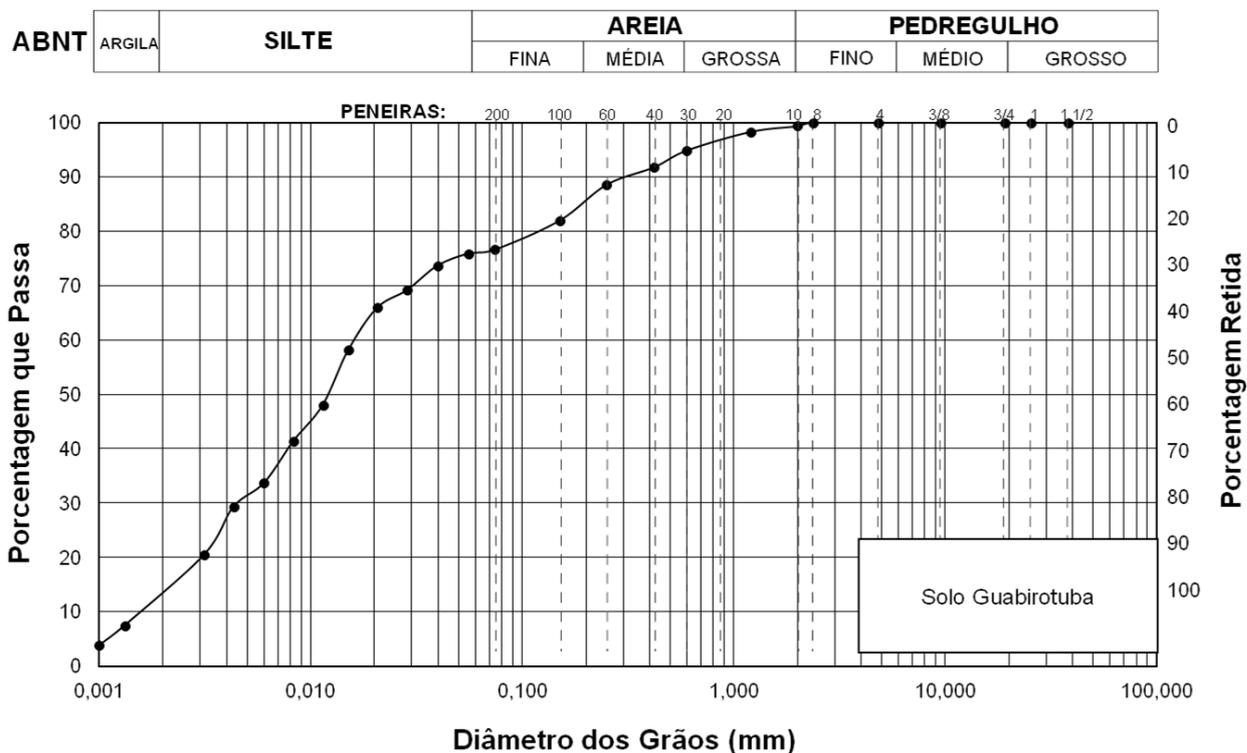


Figura 17 - Curva granulométrica do solo natural
Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 1 – Composição Granulométrica do Solo Natural.

Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
15%	61%	10%	9%	4%	1%

Fonte: Sales et al. (2017).

3.1.1.3 Limites de Atterberg

Ao executarem os ensaios de Limites de Atterberg, os autores encontraram os resultados apresentados na Tabela 2 e Tabela 3. A partir desses dados, Sales et al. (2017) concluíram que o solo natural é um solo com plasticidade média, assim como quando adicionado cimento e cal nos teores de 3% e 9%. Nos solos com adição de cal 5% e 7%, o solo passa a ser considerado muito plástico.

Ao adicionar cal no solo, espera-se que ocorra a redução do IP (CORRÊA, 2008). No entanto, as amostras com 5% e 7% de cal apresentaram resultados

diferentes do esperado. Tal fato pode ser explicado pela própria variabilidade do ensaio, pois a diferença entre o IP do solo natural e o IP das adições foi de apenas 2%.

Tabela 2 – Resumo dos Ensaio LL e LP, e Determinação do IP para Solo-Cal.

Ensaio	Teor de Cal				
	0%	3%	5%	7%	9%
LL (%)	48	48	49	48	47
LP (%)	34	34	33	32	34
IP (%)	14	14	16	16	13

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 3 – Resumo dos Ensaio LL e LP, e Determinação do IP para Solo-Cimento.

Ensaio	Teor de Cimento				
	0%	3%	5%	7%	9%
LL (%)	48	47	46	44	45
LP (%)	34	35	36	35	36
IP (%)	14	12	10	9	9

Fonte: Sales et al. (2017).

3.1.1.4 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação do solo natural e das misturas resultaram nas curvas apresentadas nas Figuras abaixo Figura 18, Figura 19 e Figura 20. A umidade ótima e o peso específico, de acordo com dados obtidos por Sales et al. (2017) do solo natural são de 27% e 1,51 g/cm³, do solo-cimento 27,1% e 1,48 g/cm³ e do solo-cal 29,8% e 1,44 g/cm³.

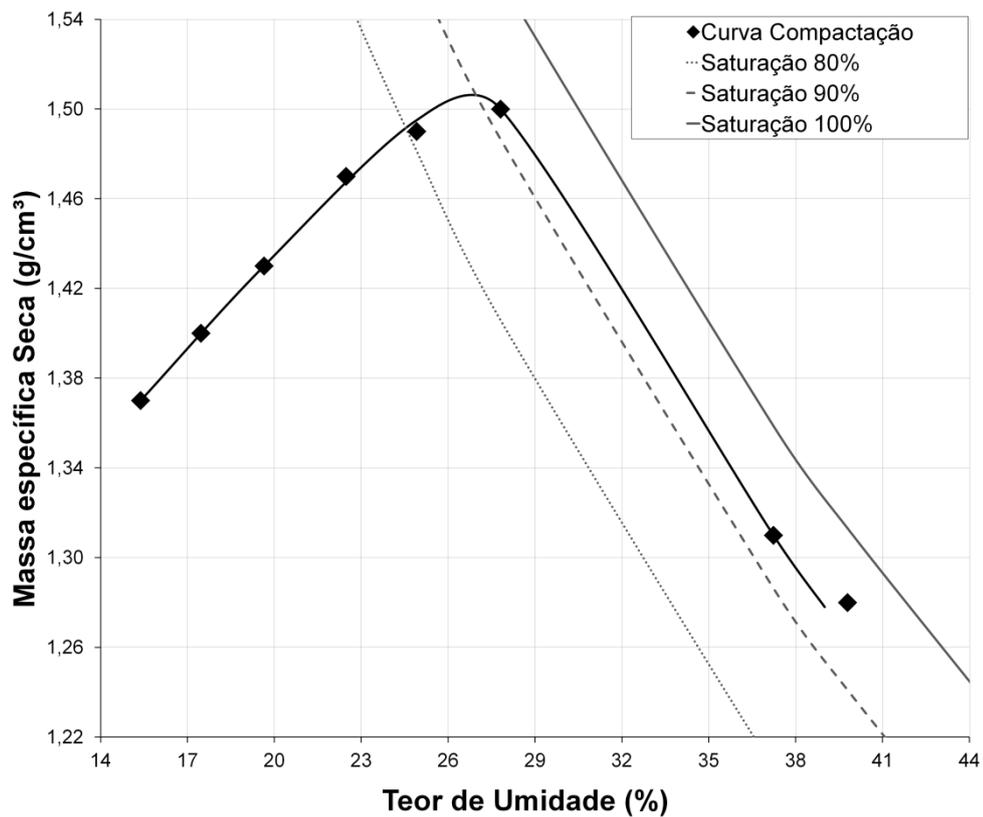


Figura 18 - Curva de compactação para solo natural
Fonte: Adaptado de Sales et al. (2017).

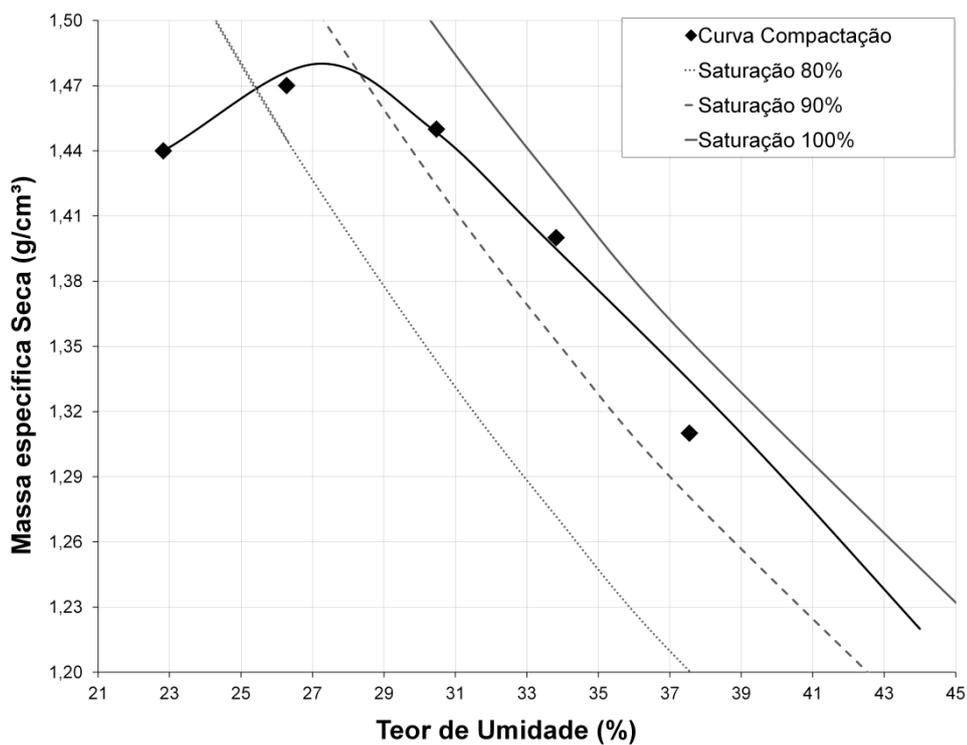


Figura 19 - Curva de compactação para solo-cimento
Fonte: Adaptado de Sales et al. (2017).

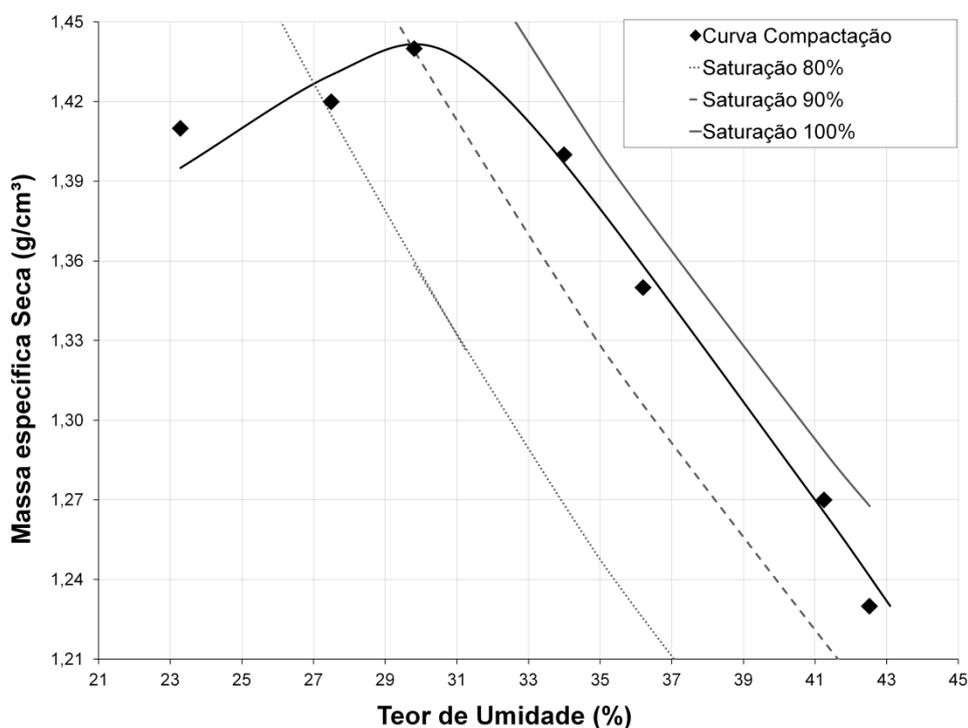


Figura 20 - Curva de compactação para solo-cal
Fonte: Adaptado de Sales et al. (2017).

3.1.1.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Sales et al. (2017) realizaram ensaios de resistência à compressão simples para o solo natural, solo-cimento - com teores de aditivo de 3%, 5%, 7% e 9% e solo-cal - com teores de aditivo de 3%, 5%, 7% e 9%, para a energia de compactação normal. Os resultados obtidos pelos autores estão apresentados nas Tabelas 4 a 12.

Tabela 4 - Resultados ensaio RCS para o solo natural - EN

Solo Natural		Ensaio de RCS				
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)
CP 01	28 dias	27,13	1,46	1959,57	1054,37	0,54
CP 02	28 dias	27,74	1,56	1947,82	632,62	0,32
CP 03	28 dias	27,90	1,46	1959,57	712,96	0,36
CP 04	28 dias	27,85	1,49	1928,31	612,54	0,32
CP 05	28 dias	28,19	1,49	1963,50	652,71	0,33

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 5 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3% - EN

Solo Cal 3%		Ensaio de RCS				
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)
CP 06	28 dias	29,25	1,45	1963,50	1074,45	0,55
CP 07	28 dias	27,48	1,47	1955,65	1184,91	0,61
CP 08	28 dias	27,28	1,48	1971,36	773,21	0,39
CP 09	28 dias	27,40	1,45	1975,29	793,29	0,40
CP 10	28 dias	28,66	1,45	1971,36	793,29	0,40

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 6 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5% - EN

Solo Cal 5%		Ensaio de RCS				
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)
CP 11	28 dias	27,41	1,50	1951,73	1325,49	0,68
CP 12	28 dias	27,19	1,50	1951,73	1425,91	0,73
CP 13	28 dias	26,64	1,48	1951,73	1215,04	0,62
CP 14	28 dias	28,29	1,47	1971,36	1516,29	0,77
CP 15	28 dias	27,69	1,50	1936,1	1305,41	0,67

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 7 - Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7% - EN

Solo Cal 7%		Ensaio de RCS				
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)
CP 16	28 dias	26,25	1,47	1979,23	1646,83	0,83
CP 17	28 dias	26,53	1,22	1903,10	652,71	0,34
CP 18	28 dias	27,25	1,36	1920,54	1435,95	0,75
CP 19	28 dias	27,27	1,48	1928,31	1345,58	0,70
CP 20	28 dias	26,93	1,51	1932,21	1847,66	0,96

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 8 - Resultados ensaio RCS pra o solo-cal 9% - EN

Solo Cal 9%		Ensaio de RCS				
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)
CP 21	28 dias	27,14	1,50	1973,33	1978,2	1,00
CP 22	28 dias	27,98	1,44	1967,42	1867,74	0,95
CP 23	28 dias	27,09	1,35	2000,98	1466,08	0,73
CP 24	28 dias	28,27	1,54	1969,39	1335,54	0,68
CP 25	28 dias	27,26	1,44	1971,36	2420,03	1,23

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 9 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3% - EN

Solo Cim. 3%		Ensaio de RCS					
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)	
CP 26	28 dias	26,32	1,49	1971,36	1767,33	0,90	
CP 27	28 dias	27,50	1,47	1971,36	1686,99	0,86	
CP 28	28 dias	26,78	1,49	1969,39	1697,04	0,86	
CP 29	28 dias	26,74	1,48	1963,50	1606,66	0,82	
CP 30	28 dias	26,85	1,51	1971,36	1897,87	0,96	

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 10 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5% - EN

Solo Cim. 5%		Ensaio de RCS					
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)	
CP 31	28 dias	26,03	1,49	1971,36	3303,7	1,68	
CP 32	28 dias	26,60	1,51	1963,50	2922,11	1,49	
CP 33	28 dias	26,76	1,47	1963,50	2791,57	1,42	
CP 34	28 dias	25,62	1,51	1971,36	3524,61	1,79	
CP 35	28 dias	27,35	1,47	1971,36	2540,53	1,29	

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 11 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7% - EN

Solo Cim. 7%		Ensaio de RCS					
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)	
CP 36	28 dias	27,22	1,48	1975,29	4307,86	2,18	
CP 37	28 dias	26,26	1,50	1967,42	4438,40	2,26	
CP 38	28 dias	26,66	1,50	1967,42	4227,53	2,15	
CP 39	28 dias	26,82	1,50	1955,65	4358,07	2,23	
CP 40	28 dias	26,41	1,50	1967,42	4036,73	2,05	

Fonte: Sales et al. (2017).

Tabela 12 - Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9% - EN

Solo Cim. 9%		Ensaio de RCS					
Identificação	Tempo de Cura	ω (%)	γ (g/cm ³)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (Mpa)	
CP 41	28 dias	28,47	1,49	1951,73	5241,73	2,69	
CP 42	28 dias	28,11	1,49	1936,10	4518,73	2,33	
CP 43	28 dias	27,53	1,48	1963,50	3765,61	1,92	
CP 44	28 dias	28,89	1,43	1963,50	4348,03	2,21	
CP 45	28 dias	26,91	1,51	1951,73	5452,60	2,79	

Fonte: Sales et al. (2017).

Para a moldagem dos corpos de prova, Sales et al. (2017) adotaram massa específica aparente seca de $1,51 \text{ g/cm}^3$ e umidade de 27%, conforme valores obtidos no ensaio de compactação. A partir dos valores encontrados após a moldagem e rompimento, os autores utilizaram dois parâmetros para tratamento de dados: foram desconsiderados corpos de prova que apresentaram variações maiores que 5%, para a massa específica, e, umidade e foram rejeitados resultados de resistência à compressão que variaram mais que 10% em relação à média aritmética.

3.1.2 Cal

Para este trabalho, foi utilizada a cal hidratada, tipo CH-III, regulamentada pela NBR 6473 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

3.1.3 Cimento

Devido a sua capacidade de atingir alta resistência inicial, o cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V-ARI.

3.1.4 Água

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

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Planejamento Experimental

Para desenvolvimento dessa pesquisa, foi estabelecido um programa estatístico experimental (*Design Of Experiments* – DOE), que define os fatores controláveis, as variáveis de resposta e os ensaios a serem realizados.

Tendo como objetivo analisar os efeitos da adição de cimento e de cal e da energia de compactação nos resultados de resistência à compressão simples, foram consideradas as variáveis tempo de cura, tipo de cura, teor de aditivo, tipo de aditivo e energia de compactação – responsável por definir o teor de umidade e massa específica aparente seca. Na Tabela 13, estão nomeados os fatores citados, seu tipo – fixo ou variável – e seu nível de variação. Considerando que esse projeto visa comparar os resultados obtidos por Sales et al. (2017) na energia de compactação normal com os resultados na energia de compactação intermediária, as variáveis foram definidas de acordo com o experimento realizado pelos autores.

Tabela 13 – Fatores controláveis para realização dos ensaios

Variável	Tipo	Níveis de variação			
Tempo de cura	Fixa	28 dias			
Tipo de cura	Fixa	Úmida sem imersão			
Energia de compactação	Fixa	Intermediária			
Tipo de aditivo	Variável	Cal CH-III		Cimento CPV-ARI	
Teor de aditivo	Variável	3%	5%	7%	9%

Fonte: Autoria própria.

Para que fosse possível executar o ensaio de resistência à compressão simples, foi necessário realizar o ensaio de compactação Proctor Intermediário. A partir do ensaio, foi determinada a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo para moldagem dos corpos de prova. O ensaio de compactação foi realizado conforme descrito no item 3.2.3 e o resultados encontram-se no item 4.1.

O ensaio de resistência à compressão simples foi executado conforme o planejamento apresentado na Tabela 14. Em conformidade com o ensaio realizado por Sales et al. (2017), foram moldados cinco corpos de prova por teor de aditivo. A descrição desse ensaio encontra-se no item 3.2.4 e os resultados e análise estão apresentados no item 4.2.

Tabela 14 – Planejamento experimental para ensaio de Resistência à Compressão Simples

Energia de compactação	Teor de Aditivo									Total
	Cimento				Cal					
	3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%	0%	
Normal (Sales et al., 2017)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
Intermediária	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
Total =										90

Fonte: Autoria própria.

As misturas solo-cimento e solo-cal serão tratadas como dois experimentos diferentes, ou seja, será realizada uma análise independente para cada mistura. Dessa maneira, será gerada uma equação de regressão e uma superfície de resposta para cada uma. Conforme definido no item 2.3.1, a variável “teor de aditivo” foi considerada como fator A, com níveis inferior 3% e superior 9% e a variável “energia de compactação” foi definida como fator B, com níveis inferior EN e superior EI. Assim, a análise será desenvolvida conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Planejamento experimental segundo DOE para análise fatorial

Fator	Nível	Variação	
A	Baixo	-	3%
	Alto	+	9%
B	Baixo	-	EN
	Alto	+	EI

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Preparação do solo

Para a realização dos ensaios, a amostra de solo foi preparada de acordo com as normas NBR 6457 (ABNT, 2016), que define a preparação para ensaios de compactação e caracterização e NBR 12024 (ABNT, 2012), que define a preparação de amostra para moldagem de corpos de prova de solo-cimento.

A amostra de solo foi seca ao ar e destorroada até que todo material fosse passante na peneira de 4,8 mm. Em seguida, o material foi armazenado em recipiente vedado, para evitar alteração da umidade. Antes da realização dos ensaios, foram realizadas verificações da umidade higroscópica para correta execução dos mesmos.

3.2.3 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação intermediária foi realizado de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), para o solo natural e para as misturas solo-cimento e solo-cal. Conforme executado por Sales et al. (2017), o ensaio foi realizado apenas com o teor de aditivo de 3%. Tal escolha foi fundamentada pelos dados obtidos por Bordignon (2015), apresentados na Tabela 16.

Sales et al. (2017), destacam que os valores obtidos para umidade e massa específica aparente seca, para os teores 0%, 3%, 6%, 8% e 16%, apresentaram desvio padrão de 0,0065 e 0,0169, respectivamente. Desse modo, devido à baixa variância encontrada, os autores assumiram que não havia diferença significativa entre os valores.

Tabela 16 – Relação teor de umidade x peso específico aparente seco

Medidas	Solo + adição para a energia normal de compactação				
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
ω ótima (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53
Yd máx.	1,515	1,510	1,491	1,509	1,481
Medidas	Solo + adição para a energia intermediária de compactação				
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
ω ótima (%)	25,55	24,48	25,27	24,75	24,08
Yd máx.	1,554	1,598	1,563	1,578	1,561

Fonte: Bordignon (2015).

Para que fosse possível validar essa escolha, foi realizado um teste de hipótese t de *Student*. O teste foi realizado para os dados de ambas as energias, normal (Y1) e intermediária (Y2), através do software R. O valor encontrado para a energia normal foi $p - valor = 0,1824$, e para a energia intermediária $p - valor = 0,07449$, sendo que para ser validada a hipótese o valor de $p - valor$ deve ser maior que 0,05.

H_0 : não há diferença entre os valores

```
Y1<-c(1.510,1.491,1.509,1.481)#normal
t.test(Y1,mu=1.510) # 3 por cento
```

One Sample t-test

```

data: Y1
t = -1.7285, df = 3, p-value = 0.1824
alternative hypothesis: true mean is not equal to 1.51
95 percent confidence interval:
 1.475195 1.520305
sample estimates:
mean of x 1.49775

```

```

Y2<-c(1.598,1.563,1.578,1.561)#intermediaria
t.test(Y2,mu=1.598) # 3 por cento

```

One Sample t-test

```

data: Y2
t = -2.6889, df = 3, p-value = 0.07449
alternative hypothesis: true mean is not equal to 1.598
95 percent confidence interval:
 1.547778 1.602222
sample estimates:
mean of x 1.575

```

Para realização do ensaio, foi utilizado o solo preparado conforme descrito no item 3.2.2. Para cada uma das três curvas - solo natural, solo-cimento e solo-cal – foi feito o ensaio para cinco pontos, dois no ramo úmido, um próximo ao ponto máximo e dois no ramo seco.

Inicialmente, foi adicionado o aditivo químico, cimento ou cal, e feita a homogeneização do material. Em seguida, adicionou-se água em todas as amostras, conforme umidade estipulada para cada ponto. Após a homogeneização da mistura, iniciou-se a compactação, em três camadas. Conforme especificado pela NBR 7182 (ABNT, 2016), foram aplicados 21 golpes por camada, utilizando o soquete grande, e foi feita a escarificação entre cada camada para promover maior aderência entre elas.

Após a finalização da compactação, foi verificada a massa do conjunto cilindro e solo úmido compactado. Em sequência, retirou-se o corpo de prova do molde, com o auxílio de um extrator, recolhendo três amostras para determinação da umidade. O procedimento foi repetido para os cinco pontos das três curvas de compactação.

Para a execução desse ensaio, foi utilizada uma balança com precisão de ± 2 g, para pesagens de até 20 kg e uma balança com precisão de $\pm 0,01$ g, para pesagens de até 2 kg. O molde cilíndrico utilizado apresenta volume de 1.000 cm³ e o soquete possui massa de 4.536 g, conforme especificado pela NBR 7182 (ABNT, 2016).

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão simples foi realizada conforme a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), que rege a moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento.

O solo utilizado na moldagem foi preparado conforme descrito no item 3.2.2. Inicialmente, foi adicionado o aditivo e misturado até formar uma massa uniforme. Em seguida, adicionou-se água para alcançar a umidade ótima, com 1,0 ponto percentual a mais de umidade para compensar a perda por evaporação, e misturou-se os materiais até obter uma mistura homogênea. Para verificação da umidade na moldagem, foram retiradas três amostras de cada mistura.

A moldagem foi realizada em molde cilíndrico de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com auxílio de uma prensa automática, em três camadas, sendo realizada escarificação entre as camadas com o objetivo de promover maior aderência entre elas. Após moldagem, os corpos de prova foram extraídos com auxílio de um extrator e tiveram sua massa e dimensões medidas para verificação da massa específica atingida.

Os corpos de prova foram embalados em plástico filme de PVC e armazenados em câmara úmida para evitar perda de umidade. Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados após 28 dias, para que as misturas atingissem a cura necessária.

Para a execução dessa etapa, foi utilizada uma balança com precisão de $\pm 0,01$ g e paquímetro com precisão de $\pm 0,05$ mm.

3.2.5 Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 2012), para os 45 corpos de prova, detalhados no item 3.2.1, na Tabela 14.

Para execução do ensaio, cada corpo de prova foi colocado sobre o prato inferior da prensa, centralizado com a máquina e então foi iniciado o carregamento até a ruptura. Após o rompimento dos corpos de prova, foram recolhidas amostras para verificação da constância da umidade.

O modelo da prensa utilizada foi o DL 30000N, da marca EMIC, com velocidade de deformação de 0,20 mm por minuto e capacidade máxima de 30.000 kgf.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os dados obtidos a partir do ensaio de compactação para o solo natural na energia intermediária estão apresentados na Tabela 17. A partir da curva obtida, traçada na Figura 21, a massa específica aparente seca máxima foi definida como $1,62 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade ótimo foi definido como 20,5%.

Tabela 17 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para o solo natural

	w (%)	γ_d (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³) - 100%	γ_d (g/cm ³) - 90%	γ_d (g/cm ³) - 80%
CP1	12,25	1,585	2,058	2,002	1,936
CP2	16,82	1,611	1,881	1,817	1,743
CP3	21,25	1,618	1,736	1,668	1,590
CP4	26,00	1,574	1,604	1,533	1,452
CP5	31,20	1,451	1,480	1,408	1,327

Fonte: Autoria própria.

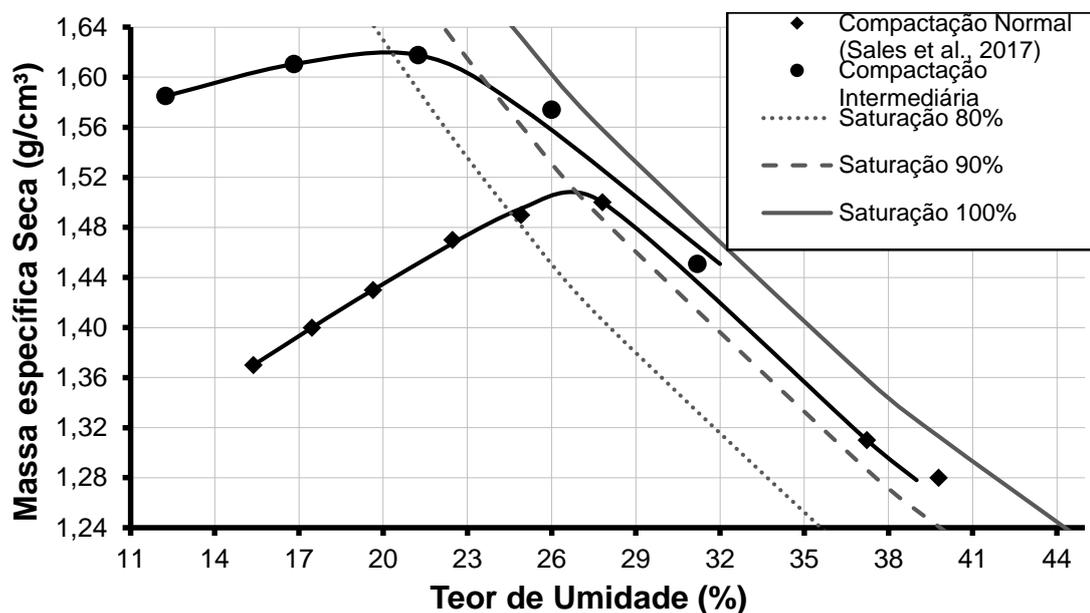


Figura 21 – Curvas de compactação para solo natural, normal e intermediária
Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo natural

Energia de compactação	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,51	27,0
Intermediária	1,62	20,5

Fonte: Autoria própria.

Conforme descrito no tópico 3.2.1, foi realizado ensaio de compactação para mistura solo-cimento com 3% de teor de aditivo. Os resultados estão expressos na Tabela 19. A curva, apresentada na Figura 22, obtida para a energia de compactação intermediária, resultou em uma massa específica seca máxima de 1,62 g/cm³ e um teor de umidade ótimo de 19%.

Tabela 19 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para mistura solo-cimento

	w (%)	γ_d (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³) - 100%	γ_d (g/cm ³) - 90%	γ_d (g/cm ³) - 80%
CP1	11,90	1,576	2,073	2,017	1,952
CP2	15,83	1,619	1,917	1,854	1,781
CP3	21,24	1,616	1,736	1,668	1,590
CP4	26,34	1,564	1,595	1,524	1,444
CP5	29,63	1,491	1,516	1,444	1,363

Fonte: Autoria própria.

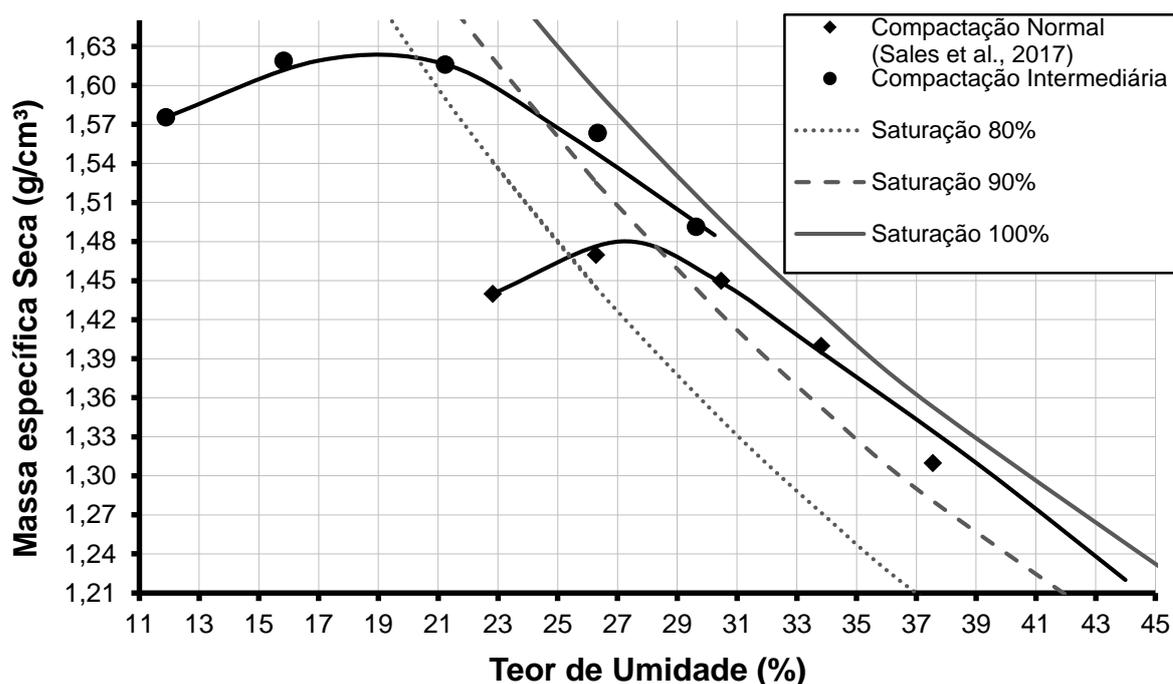


Figura 22 – Curvas de compactação para solo-cimento, normal e intermediária
Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo-cimento

Energia de compactação	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,48	27,1
Intermediária	1,62	19,0

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 21 apresenta os dados obtidos no ensaio de compactação da mistura solo-cal com 3% de teor de aditivo. Os valores encontrados para massa específica seca aparente máxima e teor de umidade ótimo foram de 1,60 g/cm³ e 19,0 %.

Tabela 21 – Dados obtidos no ensaio de compactação intermediária para mistura solo-cal

	w (%)	γ_d (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³) - 100%	γ_d (g/cm ³) - 90%	γ_d (g/cm ³) - 80%
CP1	11,90	1,576	2,073	2,017	1,952
CP2	15,83	1,619	1,917	1,854	1,781
CP3	21,24	1,616	1,736	1,668	1,590
CP4	26,34	1,564	1,595	1,524	1,444
CP5	29,63	1,491	1,516	1,444	1,363

Fonte: Autoria própria.

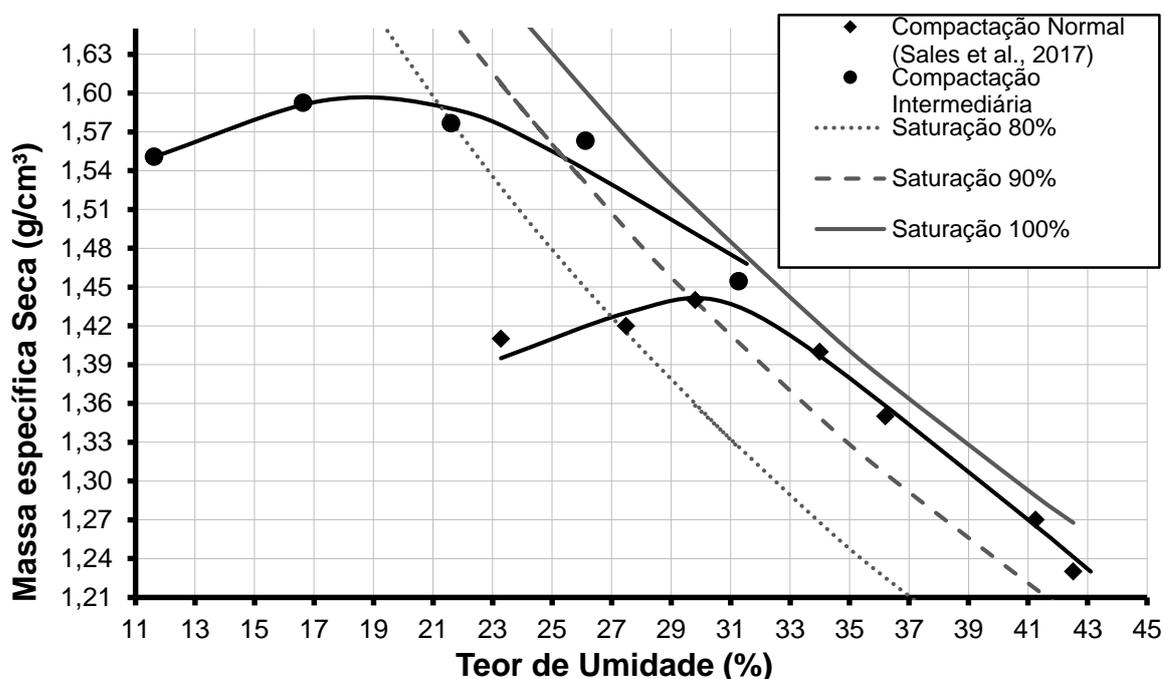


Figura 23 – Curvas de compactação para solo-cal, normal e intermediária

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Comparação entre valores encontrados no ensaio de compactação do solo cal

Energia de compactação	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
Normal (Sales et al., 2017)	1,44	29,8
Intermediária	1,60	19,0

Fonte: Autoria própria.

A partir das Figuras 21, 22 e 23 e das Tabelas 18, 20 e 22, é possível comparar os dados obtidos para energia normal e para energia intermediária.

Conforme esperado, em todas as misturas ocorreu o aumento da massa específica seca e a diminuição da umidade ótima, resultando em um deslocamento acima e a esquerda da curva intermediária em relação à curva normal.

Na Figura 24, pode-se observar os efeitos causados pela mudança de energia de compactação e pela adição de cimento e cal na curva de compactação do solo. Para a energia intermediária, pode-se notar que as curvas do solo natural e do solo-cimento apresentaram formato e resultados bem similares. Enquanto, para a energia normal, a curva do solo-cimento ficou um pouco abaixo do solo natural. De acordo com Vitali (2008), tem-se verificado na literatura que a adição de cimento ao solo não exerce grande influência nos valores de umidade ótima e massa específica máxima. Portanto, pode-se concluir que os resultados estão dentro do esperado.

Para ambas as energias de compactação, a mistura solo-cal resultou em um menor valor para massa específica aparente seca máxima e um valor maior para a umidade ótima. Os resultados encontrados seguem a tendência de comportamento de misturas solo-cal, já observadas por outros autores como Pomatti (2000), Asgari et al. (2013) e Silva (2016).

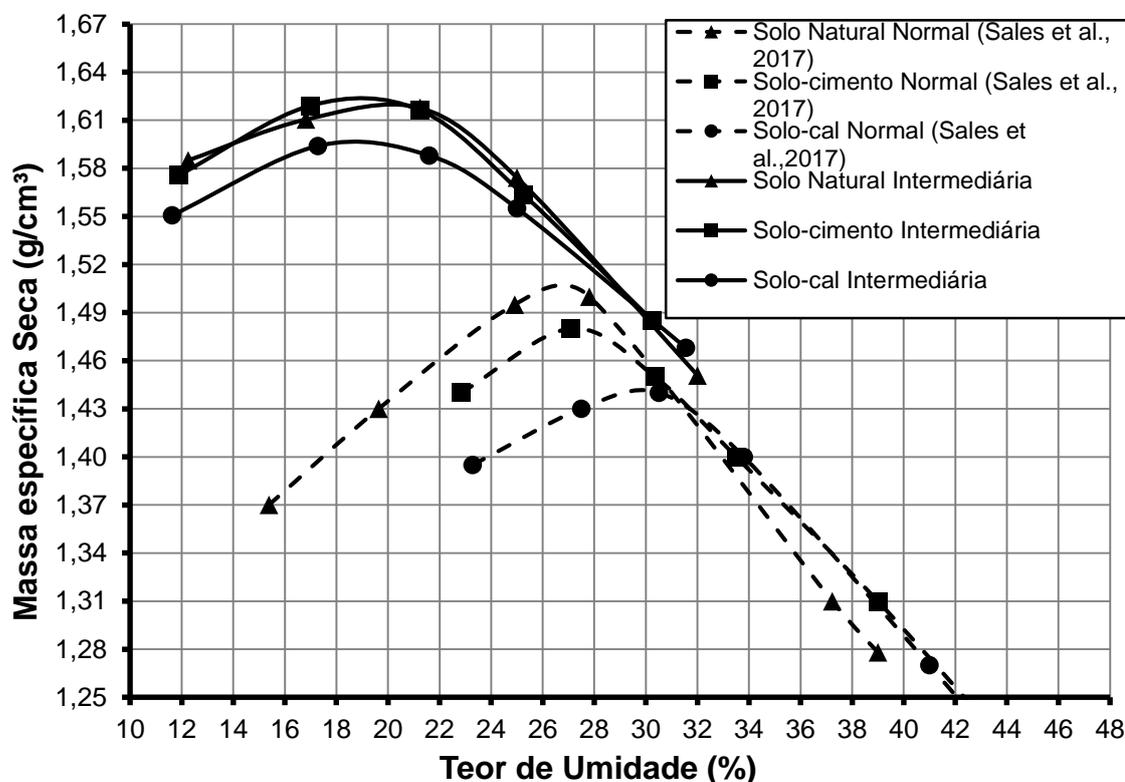


Figura 24 – Curvas de compactação normal e intermediária
Fonte: Autoria própria.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para corpos de prova de solo natural, solo-cimento e solo-cal, sendo estes últimos com teor de aditivo de 3%, 5%, 7% e 9%. Para moldagem dos corpos de prova, foi considerado teor de umidade e massa específica seca aparente máxima, de 20,5% e 1,62 g/cm³ respectivamente. Com o objetivo de justificar a utilização dos mesmos valores para o solo natural e para as misturas solo-cal e solo-cimento, foi realizado teste de t de *student*. O valor encontrado para a massa específica foi $p - valor = 0,4226$, e para a umidade $p - valor = 0,3081$, sendo que para ser validada a hipótese o valor de $p - valor$ deverá ser maior que 0,05.

H_0 : não há diferença entre os valores

```
Y1<-c(1.62,1.60,1.62)#massa especifica
t.test(y,mu = 1.62)

One Sample t-test

data: y
t = -1, df = 2, p-value = 0.4226
alternative hypothesis: true mean is not equal to 1.62
95 percent confidence interval:
 1.584649 1.642018
sample estimates:
mean of x 1.613333

Y2<-c(20.5,20,19)#umidade
t.test(y,mu = 20.5)

One Sample t-test

data: y
t = -1.5119, df = 2, p-value = 0.2697
alternative hypothesis: true mean is not equal to 20.5
95 percent confidence interval:
 17.93604 21.73062
sample estimates:
mean of x 19.83333
```

Para validação dos resultados, foi aceita uma variação de 5%, para mais ou para menos, da massa específica aparente seca. Para o teor de umidade, foi aceita variação de até 10%, devido ao erro aleatório e ao erro sistemático, que inclui a ausência de um ambiente com condições controladas de temperatura e umidade do ar, podendo causar alta perda de umidade no processo de mistura e moldagem.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para energia intermediária estão expressos nas Tabelas 23 a 31.

Tabela 23 – Resultados ensaio RCS para o solo natural - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,63	19,2	0,70
CP2	1,63	19,2	0,33
CP3	1,63	19,2	0,62
CP4	1,64	19,2	0,54
CP5	1,63	19,2	0,52

Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 3% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,64	18,5	1,74
CP2	1,68	18,5	1,65
CP3	1,64	18,5	1,43
CP4	1,64	18,5	1,63
CP5	1,63	18,5	1,41

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 5% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,64	18,9	2,26
CP2	1,64	18,9	2,43
CP3	1,64	18,9	2,42
CP4	1,62	18,9	2,13
CP5	1,66	18,9	2,22

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 7% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,62	19,59	2,27
CP2	1,63	19,59	2,34
CP3	1,64	19,59	2,73
CP4	1,63	19,59	2,28
CP5	1,64	19,59	2,51

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 – Resultados ensaio RCS para o solo-cimento 9% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,60	20,6	2,74
CP2	1,58	20,6	1,80
CP3	1,61	20,6	2,51
CP4	1,59	20,6	2,82
CP5	1,60	20,6	3,41

Fonte: Autoria própria.

Tabela 28 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 3% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,64	19,0	0,99
CP2	1,64	19,0	1,15
CP3	1,64	19,0	0,88
CP4	1,66	19,0	0,83
CP5	1,63	19,0	0,88

Fonte: Autoria própria.

Tabela 29 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 5% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,64	20,3	0,96
CP2	1,62	20,3	0,71
CP3	1,63	20,3	0,94
CP4	1,64	20,3	1,05
CP5	1,63	20,3	0,93

Fonte: Autoria própria.

Tabela 30 – Resultados ensaio RCS para o solo-cal 7% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,62	20,5	1,08
CP2	1,62	20,5	1,05
CP3	1,62	20,5	1,16
CP4	1,62	20,5	1,13
CP5	1,62	20,5	1,04

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31 – Resultados ensaio de RCS para o solo-cal 9% - EI

	Y_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (MPa)
CP1	1,62	20,6	1,13
CP2	1,61	20,6	1,08
CP3	1,63	20,6	1,20
CP4	1,61	20,6	1,20
CP5	1,59	20,6	0,96

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados, foram calculadas as tensões médias de cada mistura, apresentadas na Tabela 32. Foram utilizados os mesmos parâmetro de tratamento de dados para os resultados obtidos nessa pesquisa e para os resultados obtidos por Sales et al. (2017).

Tabela 32 - Resultados médios de Resistência à Compressão Simples em Mpa

	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	0,59	1,57	2,29	2,42	2,69	0,90	0,97	1,09	1,11	

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 25 e 26 apresentam a comparação entre os resultados da compactação normal e da compactação intermediária, para as misturas solo-cimento e solo-cal, respectivamente.

Observa-se que na mistura solo-cimento, para ambas as energias há um crescimento maior entre os teores de 3% e 5%, enquanto entre 7% e 9% o aumento

da resistência é menor. É possível também verificar que, para os intervalos mencionados, a inclinação de crescimento é similar para as duas energias, sendo quase paralelas. No entanto, entre os teores de 5% e 7% a taxa de crescimento foi maior na energia normal do que na intermediária.

Para a mistura solo-cal, pode-se observar um aumento maior entre os resultados de energia normal e intermediária para o teor de 3% de aditivo. Verifica-se que houve maior taxa de crescimento entre teores na energia de compactação normal.

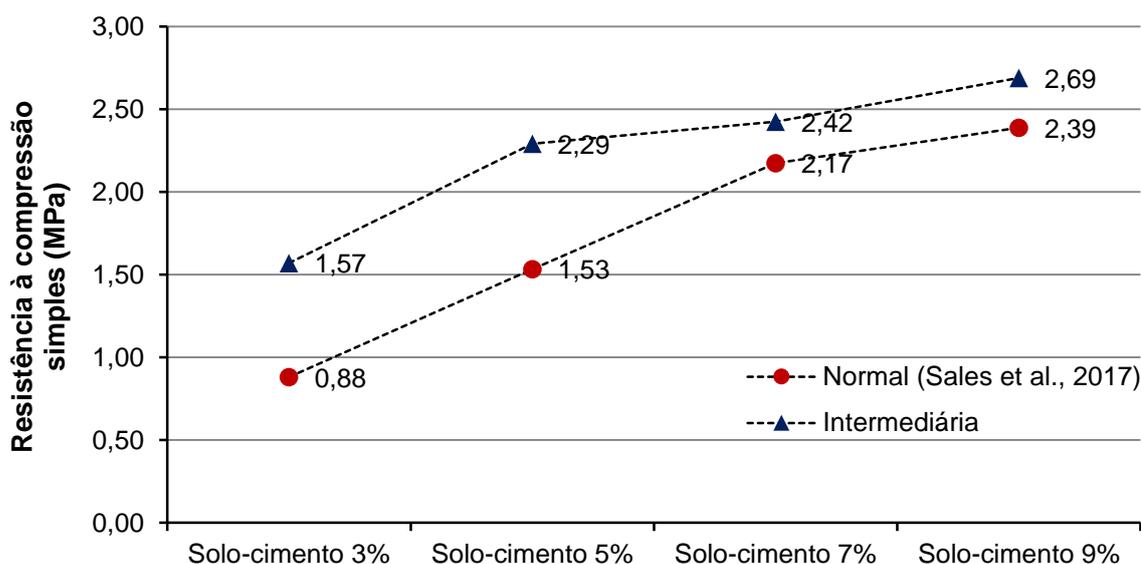


Figura 25 – Comparação resultados solo-cimento
Fonte: Autoria própria.

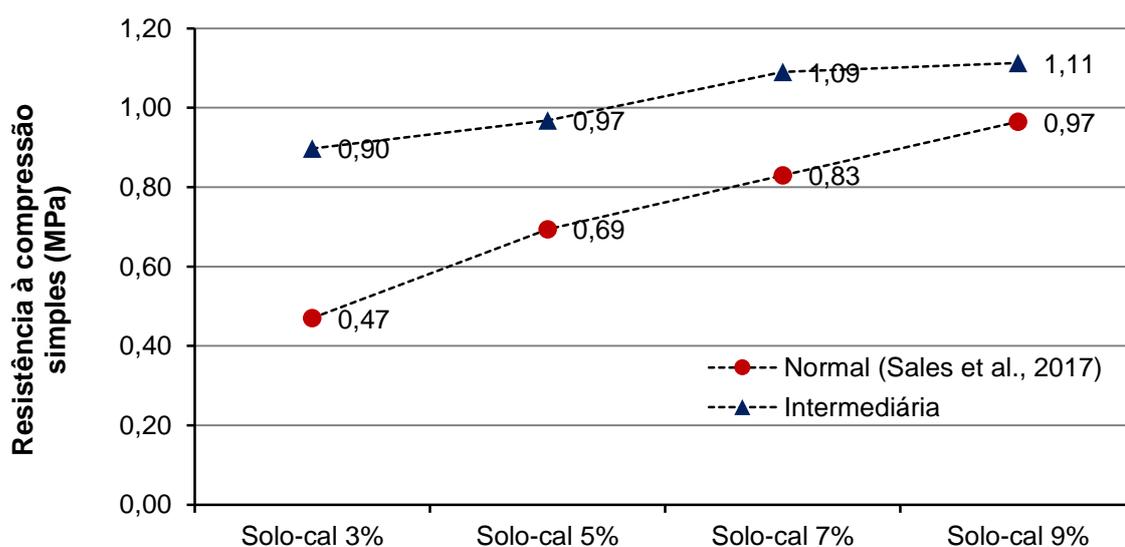


Figura 26 – Comparação resultados solo-cal
Fonte: Autoria própria.

É possível também fazer uma comparação entre as misturas solo-cimento e solo-cal, para a compactação na energia normal e na energia intermediária, conforme apresentado nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Observa-se que em ambos os casos a mistura solo-cimento mostrou um crescimento maior com relação à mistura solo-cal, conforme esperado.

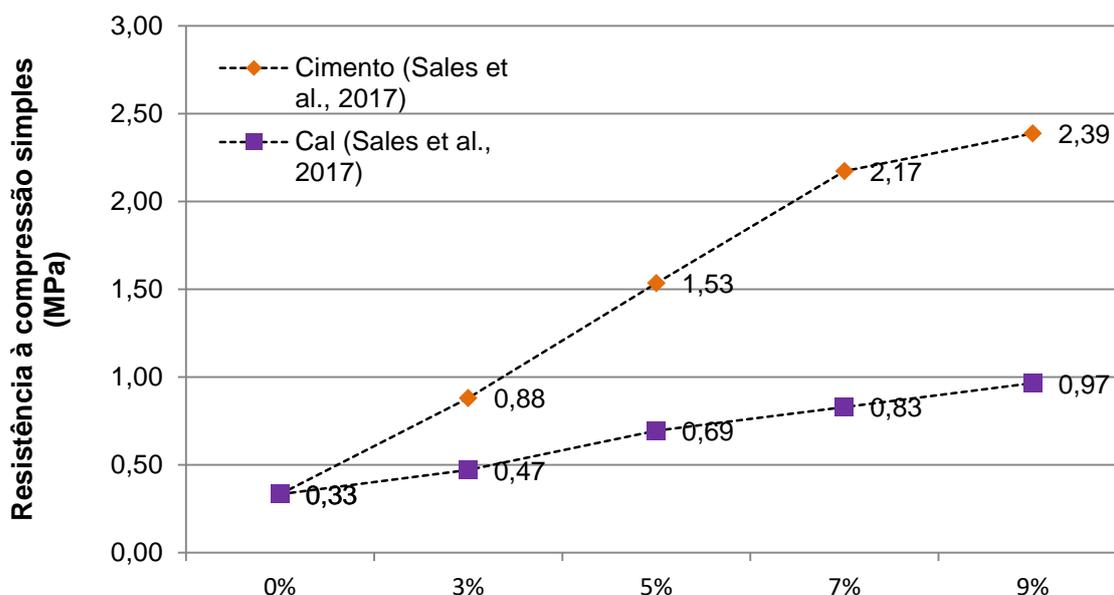


Figura 27 – Comparação resultados normal de Sales et al. (2017)
Fonte: Autoria própria.

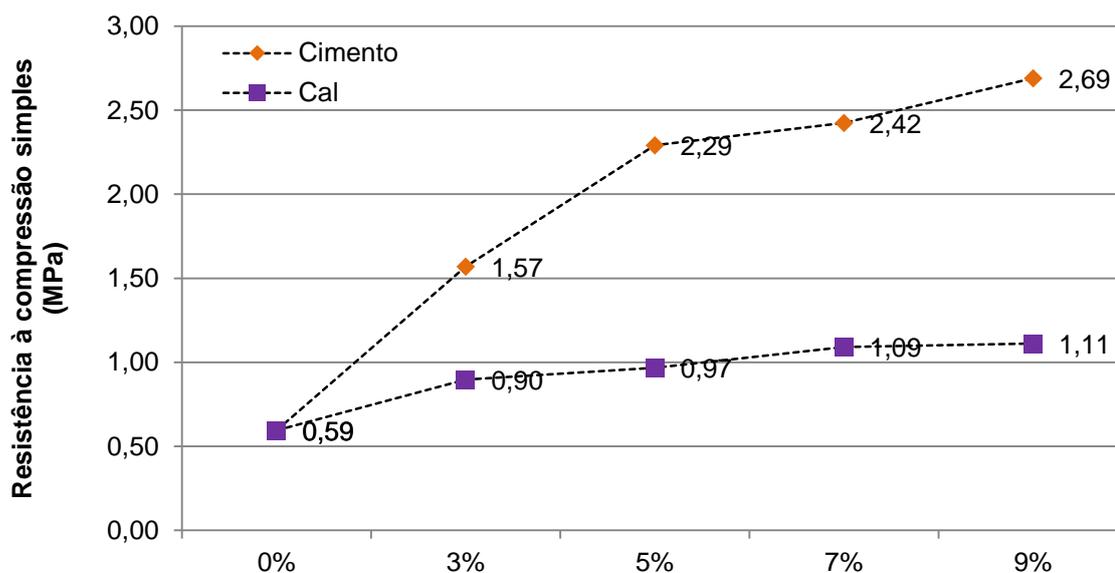


Figura 28 – Comparação resultados intermediária
Fonte: Autoria própria.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.3.1 Design para Solo-cimento

Para a análise experimental do solo-cimento, foi considerada uma amostra de cinco réplicas para cada nível dos fatores (A: teor de aditivo, B: energia de compactação). A Tabela 33 apresenta as combinações dos fatores e as réplicas associadas a cada combinação.

Tabela 33 - Dados utilizados para a análise do Solo-Cimento

Fator		Combinação		Réplicas				
A	B			I	II	III	IV	V
-	-	3%	EN	0,90	0,86	0,86	0,82	0,96
+	-	9%	EN	2,69	2,33	1,92	2,21	2,79
-	+	3%	EI	1,74	1,65	1,43	1,63	1,41
+	+	9%	EI	2,74	1,80	2,51	2,82	3,41

Fonte: Autoria própria.

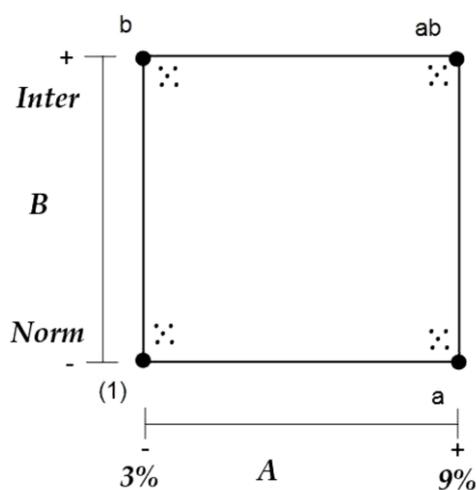


Figura 29 - Plano DOE 2^k para Solo-cimento
Fonte: Autoria própria.

Para definir as variáveis *coded*, a energia de compactação foi relacionada à massa específica aparente seca máxima. Sendo TA o teor de aditivo e EC a energia de compactação, as variáveis foram definidas conforme Equações (26) e (27).

$$x_1 = \frac{TA - \left(\frac{3\% + 9\%}{2}\right)}{\frac{9\% - 3\%}{2}} = \frac{TA}{3\%} - 2, \text{ para } X = (3\%, 9\%) \quad (26)$$

$$x_2 = \frac{EC - \left(\frac{1,51+1,62}{2}\right)}{\frac{1,62-1,51}{2}} = \frac{EC}{0,055} - 28,454545, \text{ para } X = (1,51, 1,62) \quad (27)$$

Assim, foi proposto para análise o modelo de primeira ordem, definido pela Equação (28).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (28)$$

4.3.1.1 Interação

Graficamente, é possível observar que há uma interação aparente entre as variáveis. Conforme ilustrado na Figura 30, verifica-se que as retas concorrem entre si, no entanto não se encontram. Tal fato indica que existe a possibilidade de interação (ou cruzamento) das retas para valores superiores a 9% de teor de aditivo.

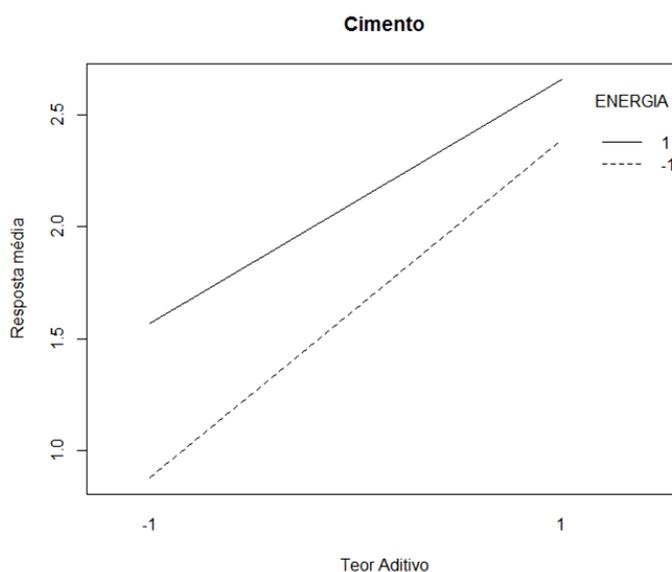


Figura 30 - Interação entre as variáveis teor de aditivo (A) e energia de compactação (B) para Solo-cimento
Fonte: Autoria própria.

4.3.1.2 Validação do modelo

O resultado da análise de resíduos pode ser observado na Figura 31, no primeiro quadro - *Residuals vs Fitted*. O gráfico indica que há falta de homocedasticidade dos dados.

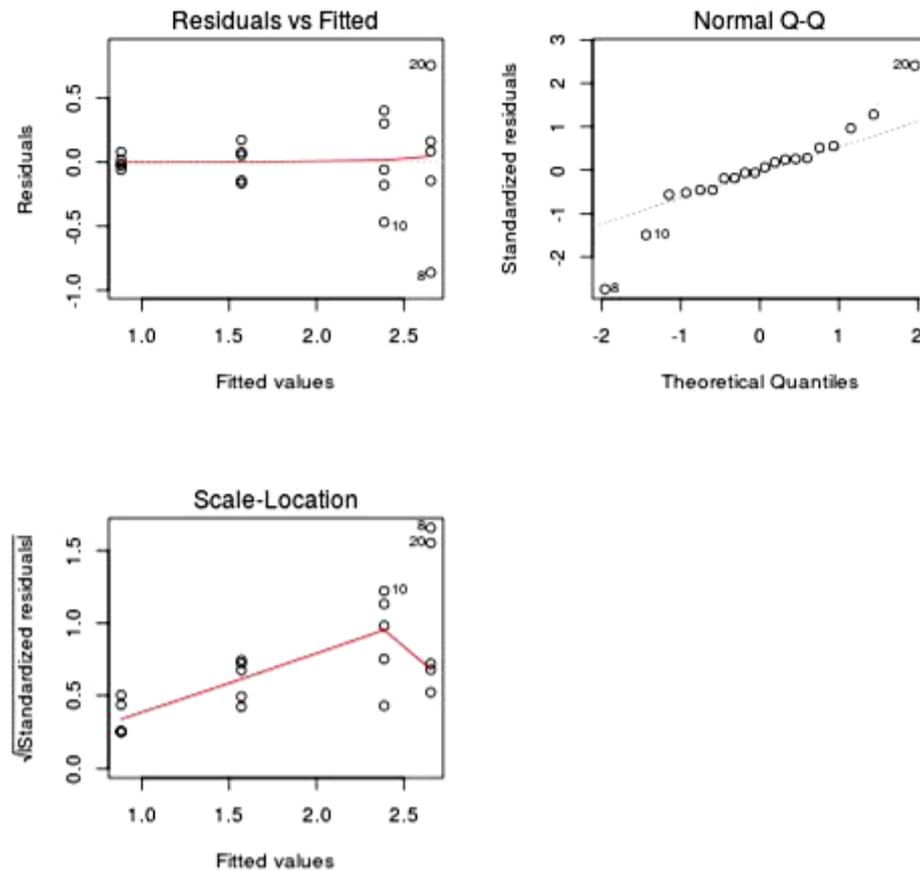


Figura 31 - Gráficos para validação dos dados Solo-cimento
 Fonte: Autoria própria.

É possível também validar o modelo pela análise numérica retornada pelo programa.

```
> summary(FirstOrderCimento)
```

Call:

```
rsm(formula = y ~ FO(X1, X2), data = planoCimento)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.87333	0.08033	23.3204	2.399e-14 ***
X1	0.64831	0.08033	8.0705	3.238e-07 ***
X2	0.23933	0.08033	2.9793	0.008417 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.8132, Adjusted R-squared: 0.7912

F-statistic: 37 on 2 and 17 DF, p-value: 6.406e-07

Analysis of Variance Table

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(X1, X2)	2	9.5516	4.7758	37.0048	6.406e-07
Residuals	17	2.1940	0.1291		
Lack of fit	1	0.2234	0.2234	1.8141	0.1968
Pure error	16	1.9706	0.1232		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

X1	X2
0.9381176	0.3463169

Corresponding increment in original units:

X1	X2
0.9381176	0.3463169

A partir da análise, verifica-se que ambas as variáveis são significativas. Observa-se também que a falta de ajuste não é significativa, no entanto, a homocedasticidade verificada nos resíduos interfere nos resultados dos dados, indicando que o modelo é inviável.

Outra característica crítica relacionada aos resíduos é a falta de normalidade, verificada através do teste de Shapiro-Wilk. O *software* retornou $p - valor = 0,003537$, sendo que $p - valor \geq 0,05$ aceita a hipótese.

H_0 : os dados são normais

```
> shapiro.test(FirstOrderCimento$fitted.values)
Shapiro-Wilk normality test
data: FirstOrderCimento$fitted.values
W = 0.83923, p-value = 0.003537
```

Com o objetivo de corrigir os problemas mencionados, os dados foram transformados para um possível ajuste. Para esse experimento, foram realizadas algumas tentativas:

- 1) Propor um modelo de segunda ordem para melhor ajuste: não houve alteração na homocedasticidade;

- 2) Transformação Box-Cox: o seu intervalo de confiança inclui a unidade, não sendo viável a transformação $Y' = Y^\lambda$, conforme ilustrado pela Figura 32;
- 3) Transformação Log: não alterou o efeito da falta de normalidade dos resíduos, demonstrando-se inviável.

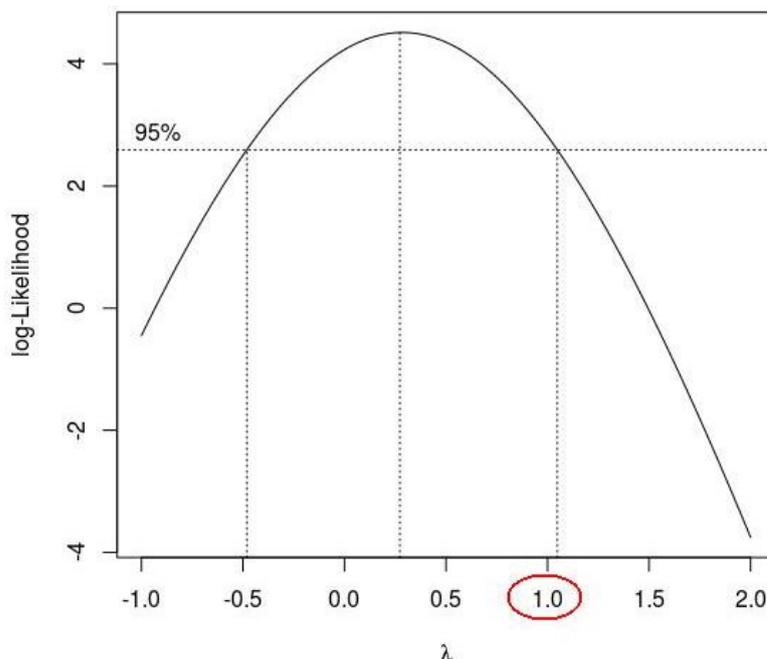


Figura 32 - Transformação BOX-COX
Fonte: Autoria própria.

4.3.1.3 Resultado para Solo-cimento

Devido a essas características que não validam o modelo proposto, pode-se deduzir que a experimentação DOE deverá ser evoluída para outros croquis 2^2 -centrado, ou propor um experimento 2^3 com a inclusão de uma nova variável, como o tempo de cura, por exemplo.

4.3.2 Design para Solo-cal

Para a análise experimental do solo-cal, foi considerada uma amostra de cinco réplicas para cada nível dos fatores (A: teor de aditivo, B: energia de compactação). A Tabela 34 apresenta as combinações dos fatores e as réplicas associadas a cada combinação.

Tabela 34 - Dados utilizados para a análise do Solo-Cal

Fator		Combinação	Réplicas				
A	B		I	II	III	IV	V
-	-	3% EN	0,55	0,61	0,39	0,40	0,40
+	-	9% EN	1,00	0,95	0,73	0,68	1,23
-	+	3% EI	0,99	1,15	0,88	0,83	0,88
+	+	9% EI	1,13	1,08	1,20	1,20	0,96

Fonte: Autoria própria.

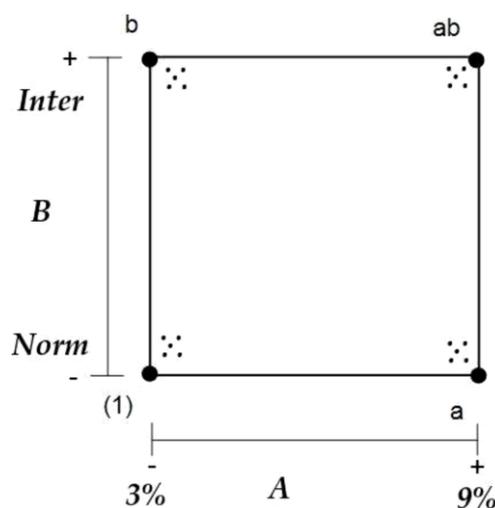


Figura 33 - Plano DOE 2^k para Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

Para definir as variáveis *coded*, a energia de compactação foi relacionada à massa específica aparente seca máxima. Sendo TA o teor de aditivo e EC a energia de compactação, as variáveis foram definidas pelas Equações (29): e (30).

$$x_1 = \frac{TA - \frac{(3\% + 9\%)}{2}}{\frac{9\% - 3\%}{2}} = \frac{TA}{3\%} - 2, \text{ para } X = (3\%, 9\%) \quad (29)$$

$$x_2 = \frac{EC - \left(\frac{1,51 + 1,62}{2}\right)}{\frac{1,62 - 1,51}{2}} = \frac{EC}{0,055} - 28,454545, \text{ para } X = (3\%, 9\%) \quad (30)$$

Assim, foi proposto para análise o modelo de segunda ordem à Equação (31).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 \quad (31)$$

4.3.2.1 Interação

A interação entre as variáveis da mistura solo-cal se mostra aparente. É possível observar na Figura 34, que as retas são concorrentes, ainda que não se cruzem. Possivelmente, ao aumentar o teor de aditivo será visível a interação entre a energia de compactação e o teor de aditivo.

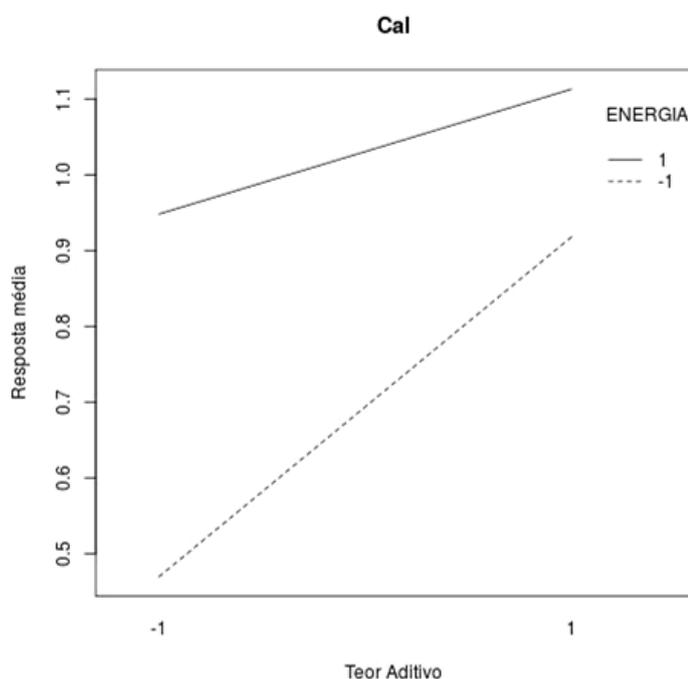


Figura 34 - Interação entre as variáveis teor de aditivo (A) e energia de compactação (B) para Solo-cal
 Fonte: Autoria própria.

4.3.2.2 Validação do modelo

Ao contrário do que ocorre na mistura solo-cimento, o solo-cal apresenta homocedasticidade dos dados, que pode ser observada na Figura 35, no primeiro quadro - *ResidualsvsFitted*.

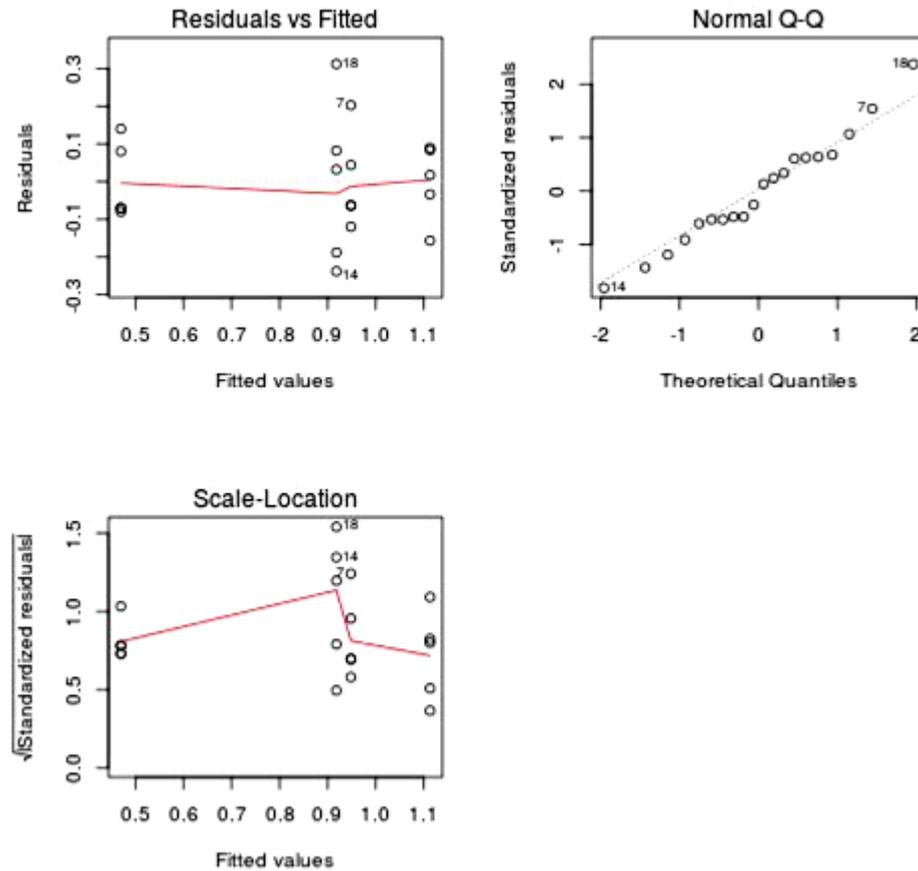


Figura 35 - Gráficos para validação dos dados para Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

A saída do *software* R mostra uma qualidade do ajuste em $R^2 = 76\%$. A interação entre os dados para o modelo de segunda ordem TWI pode ser aceita porque o seu p – *valor* $< 5\%$. Dessa forma, o modelo parece ser viável.

```
> summary(SecondOrderCal)
```

Call:

```
rsm(formula = y ~ SO(X1, X2), data = planoCal)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.238000	-0.072500	-0.008182	0.082468	0.312000

```

Coefficients: (2 not defined because of singularities)
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    0.86225    0.03286  26.242  1.4e-14 ***
FO(X1, X2)X1   0.15317    0.03286   4.662 0.000261 ***
FO(X1, X2)X2   0.16825    0.03286   5.121 0.000103 ***
TWI(X1, X2)  -0.07083    0.03286  -2.156 0.046677 *
PQ(X1, X2)X1^2      NA         NA      NA      NA
PQ(X1, X2)X2^2      NA         NA      NA      NA
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1469 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7668,    Adjusted R-squared:  0.723
F-statistic: 17.53 on 3 and 16 DF,  p-value: 2.603e-05

```

4.3.2.3 Resultado para Solo-cal

Verifica-se que o resultado foi significativo para o modelo proposto. Sejam as variáveis *coded* para o teor de aditivo x_1 e para a energia de compactação x_2 , Equações (32) e (33), respectivamente.

$$Y = 0,86225 + 0,15317 \cdot x_1 + 0,16825 \cdot x_2 - 0,07083 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (32)$$

$$Y = 0,86225 + 0,15317 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2 \right) + 0,16825 \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,454545 \right) - 0,07083 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2 \right) \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,454545 \right) \quad (33)$$

A saída do *software* R apresenta os valores para cal em yCal com o erro relativo conforme Equação (34).

$$\text{erro relativo} = \frac{\text{valor exato} - \text{valor aproximado}}{\text{valor exato}} \quad (34)$$

e o resultado da superfície de resposta com as variáveis ajustadas.

```

> ajustados<-SecondOrderCal$fitted.values
> yCal<-planoCal$y

```

```
> erro_relativo<-100*(yCal-ajustados)/yCal  
> cbind(yCal,ajustados,erro_relativo)
```

```
      yCal ajustados erro_relativo  
1  0.5500000 0.4700000    14.545455  
2  1.0000000 0.9180000     8.200000  
3  0.9921490 0.9481652     4.433185  
4  1.1302293 1.1128399     1.538572  
5  0.6100000 0.4700000    22.950820  
6  0.9500000 0.9180000     3.368421  
7  1.1506877 0.9481652    17.600127  
8  1.0790858 1.1128399    -3.128027  
9  0.3900000 0.4700000   -20.512821  
10 0.7300000 0.9180000   -25.753425  
11 0.8847487 0.9481652    -7.167741  
12 1.1967128 1.1128399     7.008605  
13 0.4000000 0.4700000   -17.500000  
14 0.6800000 0.9180000   -35.000000  
15 0.8284919 0.9481652   -14.444718  
16 1.2018261 1.1128399     7.404250  
17 0.4000000 0.4700000   -17.500000  
18 1.2300000 0.9180000    25.365854  
19 0.8847487 0.9481652    -7.167741  
20 0.9563455 1.1128399   -16.363791
```

Pode-se observar que o valor do erro ainda está alto, indicando que é preciso aumentar o teor aditivo para acima de 9% até que ocorra a interação entre as variáveis. Dessa forma, o modelo de segunda ordem deverá passar por uma melhor qualidade de ajuste, resultando na queda do erro relativo para melhor precisão. Caso o erro continue alto, é necessário avançar o experimento através de um planejamento centrado. No entanto, o modelo encontrado foi validado para primeira análise.

4.3.2.4 Superfície de resposta para Solo-cal

Dado o modelo encontrado com a Equação (35)

$$Y = 0,86225 + 0,15317 \cdot x_1 + 0,16825 \cdot x_2 - 0,07083 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (35)$$

a Figura 36 e a Figura 37 apresentam a superfície de resposta obtida para a mistura solo-cal.

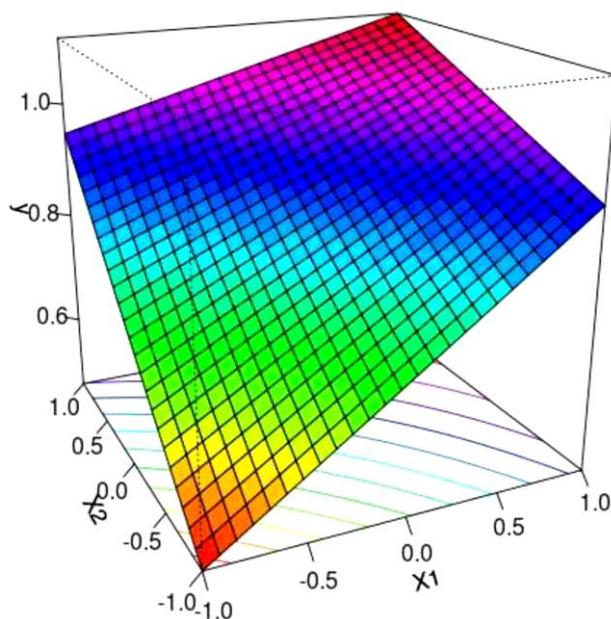


Figura 36 – Superfície de resposta para Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

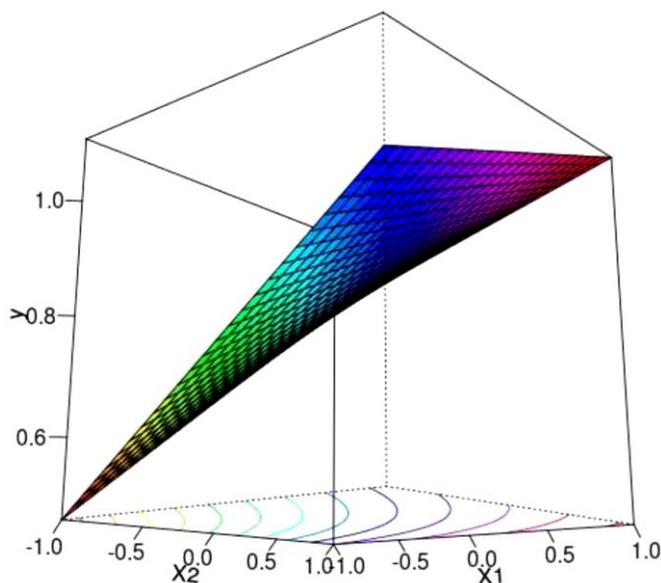


Figura 37 – Superfície de resposta para Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

4.3.2.5 Estudo da função y

É possível visualizar a curva de nível da superfície de resposta para o teor de aditivo (TA : X1) e a energia de compactação (EC : X2) na Figura 38. Para verificar o comportamento qualitativo de resposta da curva, é necessário avaliar o gradiente da função resposta, cujo objetivo é fornecer o sentido e direção de maior crescimento funcional.

$$\vec{\nabla}y = \frac{\partial y}{\partial TA} \hat{e}_{x_1} + \frac{\partial y}{\partial EC} \hat{e}_{x_2} \quad \therefore$$

$$\vec{\nabla}y = (0,15 - 0,07 \cdot x_2) \hat{e}_{x_1} + (0,17 - 0,07 \cdot x_1) \hat{e}_{x_2} \quad (36)$$

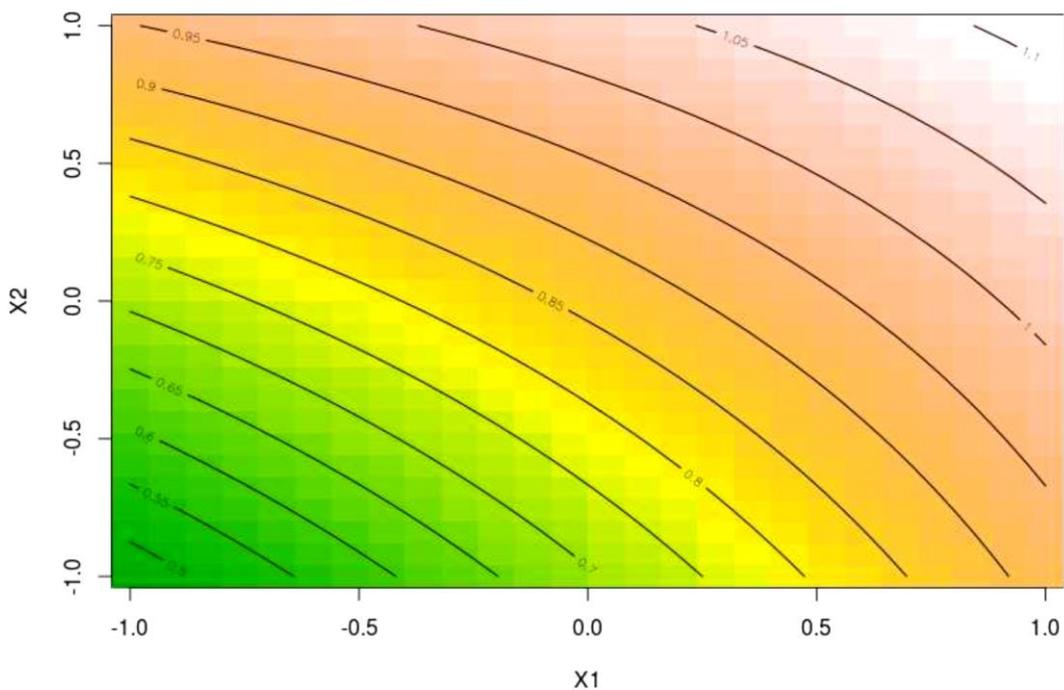


Figura 38 – Curvas de nível para superfície Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

Para avaliar o comportamento extremo da curva, tem-se que:

$$\begin{cases} \vec{\nabla}y = \vec{0} \\ H = \det \begin{bmatrix} \partial_{x_1}^2 & \partial_{x_1 x_2} \\ \partial_{x_1 x_2} & \partial_{x_2}^2 \end{bmatrix} \\ \partial_{x_1}^2 \text{ (ou } \partial_{x_2}^2) \end{cases} \quad (37)$$

Para encontrar o ponto de sela considera-se a Equação (38).

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}y &= \vec{0} \quad \therefore \\ (0,15 - 0,07 \cdot x_2)\hat{e}_{x_1} + (0,17 - 0,07 \cdot x_1)\hat{e}_{x_2} &= \vec{0} \end{aligned} \quad (38)$$

O ponto de sela encontrado para as variáveis *coded* é dado por $P(x_1, x_2)_{sela} = (2,142857, 2,428571)$. Assim, o ponto de sela em função do teor de aditivo e da energia de compactação é dado pela Equação (39).

$$P(TA, EC)_{sela} = (12,42\%, 1,6985) \quad (39)$$

Possivelmente, o ponto encontrado corresponde ao momento em que as retas concorrentes de interação se encontram, conforme ilustrado pela Figura 34. Portanto, a interação entre o teor de aditivo e a energia de compactação pode ser mais sensível perto do ponto de sela, que está próximo do teor de 12% e de massa específica aparente seca de 1,70 g/cm³.

Para determinar se o ponto encontrado também corresponde ao ponto máximo ou mínimo da função, resolve-se a matriz Hessiana.

$$\det \begin{bmatrix} 0 & -0,07 \\ -0,07 & 0 \end{bmatrix} = -0,0049 < 0 \quad (40)$$

Com o resultado negativo, é possível afirmar que o ponto encontrado é apenas um ponto de sela, não representando o valor máximo ou mínimo da função.

O resultado de $\partial_{x_1}^2 = 0$ não faz sentido.

A partir dos resultados encontrados, ainda que possa parecer um parabolóide, verifica-se que a superfície é uma sela, conforme ilustrado pela Figura 37. No entanto, não é possível identificar o ponto de sela na figura, já que este não está dentro do intervalo de limites do gráfico.

4.3.2.6 Comparação com os dados obtidos

A partir dos resultados da análise estatística, podem-se comparar os resultados obtidos em ensaio com os resultados fornecidos pela equação e superfície encontradas.

Para encontrar as respostas do modelo para teores de 5% e 7%, calcula-se inicialmente o valor x_1 correspondente pelas Equações (41) e (42).

$$x_1(5\%) = \frac{5\%}{3\%} - 2 = -0,3333 = -0, \bar{3} \quad (41)$$

$$x_1(7\%) = \frac{7\%}{3\%} - 2 = +0,3333 = +0, \bar{3} \quad (42)$$

Para a energia de compactação normal, tem-se as Equações (43) e (44).

$$Y(-0, \bar{3}, -1) = 0,86225 + 0,15317 \cdot (-0, \bar{3}) + 0,16825 \cdot (-1) - 0,07083 \cdot (-0, \bar{3}) \cdot (-1)$$

$$Y(-0, \bar{3}, -1) = 0,62 \text{ MPa} \quad (43)$$

$$Y(+0, \bar{3}, -1) = 0,86225 + 0,15317 \cdot (+0, \bar{3}) + 0,16825 \cdot (-1) - 0,07083 \cdot (+0, \bar{3}) \cdot (-1)$$

$$Y(+0, \bar{3}, -1) = 0,77 \text{ MPa} \quad (44)$$

Para a energia de compactação intermediária, tem-se as Equações (45) e (46):

$$Y(-0, \bar{3}, +1) = 0,86225 + 0,15317 \cdot (-0, \bar{3}) + 0,16825 \cdot (+1) - 0,07083 \cdot (-0, \bar{3}) \cdot (+1)$$

$$Y(-0, \bar{3}, +1) = 1,00 \text{ MPa} \quad (45)$$

$$Y(+0, \bar{3}, +1) = 0,86225 + 0,15317 \cdot (+0, \bar{3}) + 0,16825 \cdot (+1) - 0,07083 \cdot (+0, \bar{3}) \cdot (+1)$$

$$Y(+0, \bar{3}, +1) = 1,06 \text{ MPa} \quad (46)$$

Comparando os resultados obtidos através da fórmula gerada pelo modelo, verifica-se que em todos os casos, exceto solo-cal 5% na energia normal, os valores são equivalentes aos encontrados no ensaio. A Tabela 35 apresenta uma comparação

entre os dois resultados obtidos. Nota-se que para os resultados médios dos ensaios foi associado o erro aleatório (desvio padrão) das medidas, sendo aceitos os valores que estejam dentro dessa margem.

Tabela 35 - Comparação entre valores obtidos pelo modelo e ensaio

Teor de Aditivo	Energia de Compactação	Fórmula (MPa)	Ensaio (MPa)	
5%	EN	0,62	0,68 ± 0,05	0,63
	EI	1,00	0,97 ± 0,06	0,91
7%	EN	0,77	0,83 ± 0,13	0,7
	EI	1,06	1,09 ± 0,05	1,04

Fonte: Autoria própria.

Ainda que não tenha ficado dentro da margem, o valor para 5% apresentou boa aproximação dos resultados obtidos em laboratório. Deve-se considerar, que além do erro aleatório pode haver outros erros associados, como o erro sistemático da prensa. Assim, não é possível descartar a validade do modelo para essa mistura.

A partir do gradiente da função, é possível gerar um gráfico dos vetores em escala, expresso na Figura 39. Observa-se que os vetores variam em função do valor das variáveis.

Verifica-se que para valores menores das variáveis (canto inferior esquerdo), o tamanho do vetor é significativamente maior do que os vetores de valores maiores (canto superior esquerdo). Isso confirma o que já havia sido verificado na Figura 26, a taxa de crescimento da resistência é maior inicialmente e é possível verificar que há uma tendência de estabilização do crescimento. Ao analisar a Figura 38, nota-se que as curvas de nível estão mais próximas na região do ponto (-1,-1) e vão se afastando conforme avança o experimento. Tal fato reafirma a tendência de diminuição da taxa de crescimento conforme se aumenta o teor de aditivo e a energia de compactação. Considerando que o ponto de sela encontrado foi de (12,42%, 1,70 g/cm³), essa tendência pode indicar que os valores estão se aproximando do ponto de sela.

Também pode-se analisar através dos vetores, qual das variáveis exerce maior influência no crescimento da resistência. Se o vetor estiver mais inclinado para o eixo X1, significa que o teor de aditivo é mais significativo para a resistência. Caso o vetor esteja mais inclinado para o eixo X2, significa que a energia de compactação está exercendo maior influência no aumento da resistência.

Desse modo, percebe-se que quanto mais próximo da energia normal, o teor de aditivo parece ter maior influência no resultado. Ao caminhar em direção a energia intermediária, a inclinação do vetor passa a indicar maior influência da energia de compactação. Ao comparar com a Figura 26, é possível observar que há um maior crescimento entre teores na linha de energia normal do que na de energia intermediária, confirmando a indicação dos vetores.

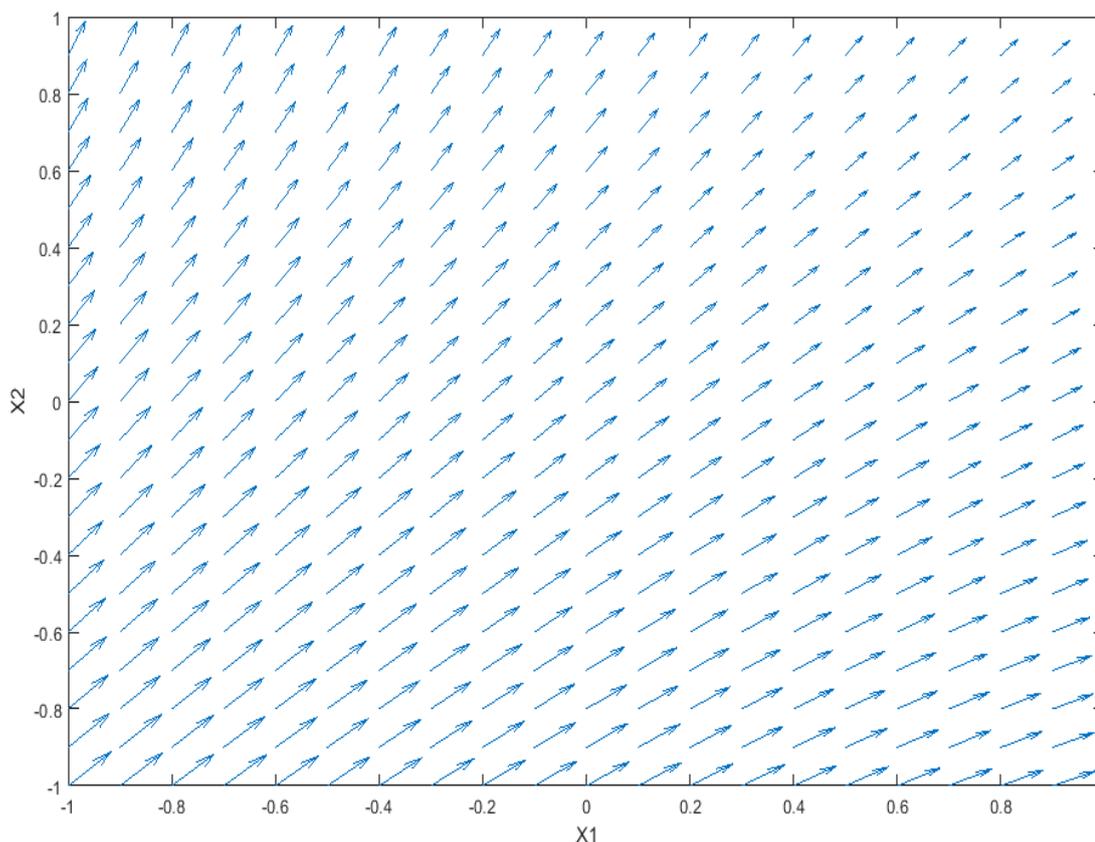


Figura 39 - Vetores gradiente da função solo-cal
Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Para a realização do planejamento fatorial, foram estudados os fatores influentes no resultado de resistência à compressão simples. Considerou-se que as misturas solo-cimento e solo-cal possuíam duas variáveis de maior influência: o teor de aditivo e a energia de compactação. Assim, os demais fatores foram fixados, enquanto estipulou-se dois níveis, mínimo e máximo, para o teor – 3% e 9% e para a energia – normal e intermediária.

O ensaio de compactação – Proctor intermediário, realizado para determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de aditivo ótimo para moldagem, apresentou resultados conforme esperado. No geral, a curva de compactação intermediária resultou em um valor maior para massa específica seca e um valor menor para teor de umidade. Entre as misturas, a curva de solo natural e solo-cimento apresentaram alta semelhança, enquanto a de cal resultou em uma menor massa específica e maior teor de umidade do que as outras duas. Foi assumido o valor de $1,62 \text{ g/cm}^3$ para massa específica aparente seca e 20,5% para o teor de umidade ótimo.

O ensaio de resistência à compressão simples para o solo-cimento, resultou em um acréscimo da resistência para todos os teores em relação ao ensaio realizado por Sales et al. (2017), na energia de compactação normal. Em ambos os casos, energia normal e intermediária, houve o crescimento da resistência entre os teores de aditivo. Maior o teor de aditivo, maior a resistência. No entanto, a mistura apresentou uma taxa de crescimento maior entre teores de aditivo menores, indicando que o aumento de resistência tende a estabilizar. Além disso, a intensidade de crescimento entre teores foi maior para os corpos de prova compactados na energia normal do que na energia intermediária. A resistência máxima alcançada pela mistura solo-cimento foi de $2,69 \pm 0,16 \text{ MPa}$, sendo teor de aditivo de 9% e energia de compactação intermediária.

Para a mistura solo-cal, observou-se também o crescimento da resistência entre os teores de aditivo e entre as energias normal e intermediária. Assim como no caso do cimento, entre teores de aditivo menores houve maior aumento da resistência. As misturas compactadas na energia normal apresentaram maior taxa de crescimento entre teores de aditivo do que as compactadas na energia intermediária. Verifica-se

também uma tendência de estabilização em função de teores de aditivo maiores. A resistência máxima alcançada pela mistura solo-cal foi de $1,09 \pm 0,05$ MPa, sendo teor de aditivo de 9% e energia de compactação intermediária.

Ao comparar os resultados das misturas solo-cal e solo-cimento, concluiu-se que em ambos os casos, energia normal e intermediária, o cimento exerce influência muito maior no crescimento da resistência. Enquanto tem-se um aumento médio de 65% para o cimento, para a cal a taxa média de crescimento é de apenas 28%.

Ao realizar a análise estatística do solo-cimento, concluiu-se que não era possível ajustar a mistura no modelo proposto. Percebeu-se na análise de resíduos a heterocedasticidade e falta de normalidade dos dados. Dessa forma, o modelo torna-se inválido. Foram feitas três tentativas de ajuste do modelo, com alteração de modelo de primeira para segunda ordem, ajuste Box-cox e ajuste logarítimo. No entanto, nenhuma das tentativas foi capaz de corrigir os dados. Isso indica que o planejamento desenvolvido não se encaixa para o solo-cimento, devendo ser alterado para nova tentativa de análise. Deve se adicionar ao planejamento 2^2 um ponto centrado (0,0). Possivelmente, esse novo modelo será capaz de solucionar o problema com os resíduos. Caso esse novo modelo não solucione o problema, pode-se concluir que as duas variáveis definidas como significativas não são suficientes para análise do solo-cimento. Assim, deve-se adicionar uma nova variável, sendo um modelo de análise 2^3 .

A análise estatística da mistura solo-cal gerou um modelo de segunda ordem. Foram verificadas a normalidade e homocedasticidade dos dados, validando o modelo. A equação gerada foi: $Y (MPa) = 0,86225 + 0,15317 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) + 0,16825 \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right) - 0,07083 \cdot \left(\frac{TA}{3\%} - 2\right) \cdot \left(\frac{EC}{0,055} - 28,45\right)$, sendo TA o teor de aditivo em % e EC o valor de massa específica máxima, relacionada à energia de compactação, em g/cm³.

Ao comparar os resultados do modelo do sol-cal com os resultados de laboratório, todos os dados e conclusões foram compatíveis. Assim, podemos afirmar que o modelo gerado através da análise é válido para misturas solo-cal do solo analisado.

5.2 SUGESTÕES

Ao realizar a análise do cimento, verificou-se que este exigia um planejamento experimental diferente. Sendo assim, sugere-se que seja desenvolvido um experimento 2^2 centrado, com o objetivo de buscar resolver os problemas encontrados na análise. É possível também desenvolver uma pesquisa 2^3 , adicionando uma terceira variável como, por exemplo, o tempo de cura.

Através do modelo gerado na análise do solo-cal, observou-se que há um ponto de sela no teor de aditivo 12% com massa específica aparente seca de 1,70 g/cm³. Esse ponto é o provável ponto de interação do experimento. Torna-se interessante realizar o experimento aumentando os valores das variáveis para que seja possível encontrar o ponto de interação e melhorar o modelo estudado.

Como os resultados do solo-cal apresentaram altos valores de erro relativo, é viável realizar um experimento 2^2 centrado com o objetivo de diminuir o erro e tornar o modelo ainda mais ajustado ao comportamento real da mistura solo-cal.

Para verificar o modelo gerado nesta pesquisa para solo-cal, é possível desenvolver um trabalho com teores de aditivo intermediários e diferentes energias de compactação, para verificar se os valores encontrados são compatíveis com a resistência calculada pelo modelo.

Este trabalho foi desenvolvido para análise da resistência a compressão simples, portanto é viável realizar um estudo para outros ensaios, como resistência à tração, CBR, entre outros.

Por fim, este mesmo modelo de análise pode ser desenvolvido para outros tipos de solo, com o objetivo de verificar se o modelo é ajustável e quais são as diferenças entre os efeitos das variáveis.

REFERÊNCIAS

_____. **NBR 6457**. Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 7182**. Solo: Ensaio de compactação. Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 12023**. Solo-Cimento – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1992.

_____. **NBR 12024**. Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

_____. **NBR 12025**. Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

_____. **NBR 12253**. Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 12254**. Solo-cimento: Execução de base de solo-cimento — Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013.

ASGARI, M. R.; BAYAT, M.; MOUSIVAND, M. **Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay**. International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development. Tabriz, Iran, 2013.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2007.

BUENO, E. S. **Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2011.

BORDIGNON, V. R. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**. Dissertação Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015. Disponível em: < <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1701> >. Acesso em: 15/11/2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos, volume 1. 6ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1988.

CARVALHO, C. A. B.; FONTES, M. P. F.; LIMA, D. C.; PORTELINHA, F. H. M. **Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers**. Soil and Rocks, São Paulo, 35(1): 51-63, January-April, 2012.

CONSOLI, N. C.; BELLAVER CORTE, M.; FESTUGATO, L. **Key parameter for tensile and compressive strength of fibre-reinforced soil-lime mixtures**. Geosynthetics International, 2012, 19, No. 5.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; MORAES, R. R. **Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil**. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. 2013.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das Melhorias das Propriedades Físicas e Mecânicas de Solos Originados de Rochas Sedimentares pela Adição de Cal para Fins de Pavimentação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2008. 151p.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2001.

CRUZ, M. L; JALALI, S. **Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso activadores de baixo custo**. 2010

CUNHA, G. H. R. I. **Estudo de compressibilidade de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2009.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 7ª ed. norte-americana, Ed. Cengage Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2011.

ENAMORADO, M. A. **Estudo Comparativo entre o Método Mecânico e o Método Físico-Químico para Dosagem do Solo-Cimento**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1990. Disponível em: < http://objdig.ufrj.br/60/-teses/civil/coppe_m/MarcioAlvaradoEnamorado.pdf >. Acesso em: 15/11/2017.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba**. MINEROPAR, 2011. 1ª Edição. 48p. Curitiba. 2011.

FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R. C.; ROSA, J. B. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. IV Seminário de Iniciação Científica. Universidade Estadual de Goiás. 2006.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. 2005. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7845/000558347.pdf?sequence=1> >. Acesso em: 27/10/2016.

FREIRE, W.J.; MILANI, A.P. da S. **Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p.1-10, 2006.

GOULARTE, C. L.; PEDREIRA, C. L. S. **Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento**. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. Pelotas. 2009.

HABIBA, A. **A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques**. International Journal of Transportation Engineering and Technology. Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 19-24. doi: 10.11648/j.ijtet.20170302.12

HESS, J. L.; GUNST, R. F.; MASON, R. L. **Statistical Design and Analysis of Experiments**. 2ª Ed. Wiley-Interscience. Hoboken, New Jersey. 2003

HOLMGREEN, R. J.; KENNEDY, T. W.; SMITH, R.; TAHMORESSI, M. **An Evaluation of Lime and Cement Satabilization**. Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin. Austin, Tex. 1987.

JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Gabirotuba: estudos de campo e laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: J. Wiley, c1969. 553 p. ISBN 0-471-51192-7

LENTH, R. V. **Response-Surface Methods in R, Using rsm**. The University of Iowa, Department of Statistics, Iowa City, United States of America, 2012.

LIMPRASERT, T.. **Behaviour of soil, soil-cement and soil-cement-fiber under multiaxial test**. (Thesis). Faculty of the Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, 1995.

LOPES JUNIOR, L. S.. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

MALLELA, J. P.; HAROLD VON QUINTUS, K.L.; Smith and E. Consultants. **Consideration of Lime-stabilized Layers in Mechanistic-empirical Pavement Design**. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5ª Ed. New York, New York. 2001.

NÓBREGA, M. T. **As reações dos argilo-minerais com a cal**. In REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, V., Anais... Associação Brasileira de Produtores de Cal, pp. 57-78. 1985.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLIVEIRA, L. C. **A Estabilização de Solos Aplicada A Habitação, Um Estudo de Misturas Solo-Cimento.** Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1994.

OLIVEIRA, R.F.V. **“Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos.”** Dissertação Universidade Federal de Ouro Preto. 2011. Disponível em: < http://www.repositorio.ufop.br/bitstream-/123456789/2382/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_An%C3%A1liseSolosModificad os.pdf > Acesso: 11/11/2017.

ORTIGÃO, J. A. R., **Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.

OSINUBI, K. J. **Permeability of Lime-Treated Lateritic Soil.** Journal of Transportation Engineering, vol. 124, Issue 5, September, 1998.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** Em 16 aulas/3ª edição. Oficina de Textos. São Paulo. 2006.

POMATTI, Kátia Elisa. **Estabilização do solo da região de São Pedro de Alcântara — SC com cal visando seu emprego na pavimentação.** Florianópolis, 2000. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina

RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil.** Tese doutorado. São Paulo. 1990.

RISSARDI, J. L. **Análise da resistência à tração de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SALAMUNI, E.. **Tectônica da Bacia Sedimentar ce Curitiba (PR).** Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 1998.

SALES, A. W.; RIBEIRO, D. D.; NERY, K. D. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação.** Trabalho de

conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Civil, Curitiba, 2017.

SANTO, M. del. SGANZERLA, F. R. **Análise do comportamento de um solo da formação guabirota reforçado pela adição de cal, aplicado à pavimentação.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia de Produção Civil, Curitiba, 2009.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016

VITALI, O. P. M. **Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2008. Disponível em: < <https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/59832/1/0001-29035.pdf> >. Acesso em: 15/11/2017