

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Isadora Goulart Castelli

ESTUDO DA DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL

Porto Alegre
Dezembro 2018

ISADORA GOULART CASTELLI

ESTUDO DA DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientador: Washington Peres Núñez
Coorientadora: Thaís Radünz Kleinert

Porto Alegre
Dezembro 2018

ISADORA GOULART CASTELLI

ESTUDO DA DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2018.

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

Thaís Radünz Kleinert
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Prof.º Lélio Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
PhD pela Universidade de Nottingham,
Inglaterra

Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Camila Kern (UFRGS)
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, que
sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi resultado não só do meu esforço, mas também do apoio de algumas pessoas e instituições, que devem ser lembradas com carinho. Assim, apresento os meus sinceros agradecimentos:

- Aos meus amados pais Wolmir Castelli e Ana Claudete Goulart Castelli, e ao meu irmão Henrique Goulart Castelli, os quais não tenho palavras para agradecer pelo amor e dedicação durante todos os anos da minha vida, ainda que à distância durante esta graduação. Agradeço por acreditarem em mim mesmo quando eu já havia perdido a coragem de seguir em frente. Obrigada pelo apoio neste momento e em outros igualmente difíceis;
- aos meus queridos avós Ideli Gonçalves Goulart e Armando da Cruz Goulart agradeço cada gesto de amor e carinho, cada reunião de família e todas as palavras de afeto. Aos meus nonos Ivide Libera Tibola Castelli e Ivanildo Domingos Castelli sou grata por tudo, pela dedicação em cada visita, pelos passeios na chácara, pelos bolos de chocolate e por todo amor. Cada uma dessas demonstrações de carinho se tornaram parte de quem sou, do meu caráter e da minha formação.
- ao meu namorado Eduardo Soares Posser e a sua família agradeço por estarem do meu lado nessa fase de conclusão da graduação, por me ouvirem falar do TCC centenas de vezes sempre acreditando que o melhor resultado seria alcançado, por sempre me ajudarem e cuidarem de mim como parte da família;
- aos meus amigos sou grata pela compreensão, paciência e por todas as palavras de incentivo. Em especial à Laura Gonçalves da Rocha e Tauana Tremel de Moraes agradeço pela parceria de sempre, durante todo esse percurso, do começo ao fim desta etapa;
- ao Professor Doutor Washington Peres Núñez, agradeço por possibilitar a minha entrada no mundo acadêmico, com a iniciação científica, logo no começo do curso. E agora sou grata por viabilizar realização desta pesquisa. À Mestre Thaís Radünz

Kleinert agradeço pela orientação fornecida durante todo o desenvolvimento deste trabalho, pela paciência e pelo carinho;

- aos integrantes do Laboratório de Geotecnologia da UFRGS (LageoTEC) que estiveram em contato comigo durante o desenvolvimento deste trabalho, e se mostraram disponíveis a me ajudar no que fosse possível;
- à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Engenharia Civil, pela infraestrutura concedida para a realização do curso e da pesquisa;
- Enfim, agradeço a todos que de alguma forma participaram deste Trabalho de Conclusão de Curso, sem vocês não seria possível.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e prove o contrário.”

Albert Einstein

RESUMO

O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil. Grande parte do transporte de passageiros e de carga é feito por meio de rodovias. As solicitações geradas no pavimento podem causar patologias nas camadas, ficando aparente no revestimento. Parte das deformações pode ser evitada, ou amenizada, com o emprego de um estabilizador nas camadas inferiores. O uso da cal nas camadas de solo é uma das soluções adotadas para dar maior estabilidade ao pavimento. A cal modifica as propriedades mecânicas e volumétricas dos solos, tornando a camada mais durável e estável. Nesse estudo foi verificada a durabilidade de misturas solo-cal para emprego como camada de pavimento. Os dois solos estudados são provenientes do estado do Rio de Janeiro (S1) e do estado de São Paulo (S2). Foi realizada a caracterização dos materiais, sendo empregada uma cal calcítica e uma dolomítica. A dosagem das misturas foi realizada a partir dos ensaios de pH e limites de Atterberg, de modo que os teores de cal adicionados nas misturas foram definidos em 3 e 5%, para ambos os solos. Os corpos de prova foram moldados conforme parâmetros definidos a partir do ensaio de compactação na energia Proctor normal. Os ensaios de durabilidade foram realizados em laboratório conforme adaptação do Método Iowa (1958), sendo que a moldagem foi realizada de forma dinâmica, e os ciclos foram apenas de molhagem e secagem. Analisaram-se o comportamento das misturas quanto aos fatores controlados – teor de cal, tipo de cal e realização ou não de ciclos. Os resultados dos ensaios de durabilidade para ambos os solos mostraram que as misturas solo-cal compactadas na energia normal não passaram quanto ao critério de durabilidade, independentemente das cales. Constatou-se que o tipo de cal influenciou significativamente nos resultados da resistência à compressão simples do S1. Para S2, os valores de resistência foram fortemente afetados pelos ciclos de molhagem e secagem, tendo o teor de cal como a segunda variável com maior influência na resistência à compressão simples.

Palavras-chaves: solo-cal, melhoramento de solo, durabilidade.

ABSTRACT

The road modal is the most used in Brazil. Much of the transportation of passengers and freight is done by means of highways. The applications generated in the pavement can cause pathologies in the layers, becoming apparent in the coating. Part of the deformation can be avoided, or mitigated, by the use of a stabilizer in the lower layers. The use of lime in the soil layers is one of the solutions adopted to give greater stability to the pavement. The lime modifies the mechanical and volumetric properties of the soils, making the layer more durable and stable. In this study, the durability of soil-lime mixtures was verified for use as a pavement layer. The two soils studied are from the state of Rio de Janeiro (S1) and the state of São Paulo (S2). The characterization of the materials was carried out, using a calcitic lime and a dolomitic one. The dosing of the blends was performed from the pH and Atterberg limits, so that the lime contents added in the blends were set at 3 and 5% for both soils. The specimens were molded according to parameters defined from the compaction test in the normal Proctor energy. The durability tests were performed in the laboratory as adapted from the Iowa Method (1958), the molding was performed in a dynamic way, and the cycles were just wetting and drying. The behavior of the mixtures was analyzed for the controlled factors - lime content, lime type and performance or non-cycling. The results of the durability test for both soils showed that the compacted soil-lime mixtures in normal energy did not pass on the criterion of durability, independently of limes. It was found that the type of lime significantly influenced the results of the resistance to simple compression of S1. For S2, the resistance values were strongly affected by the wetting and drying cycles, with the lime content as the second variable with the greatest influence on the simple compressive strength.

Keywords: solo-lime, soil improvement, durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimento-tipo flexível.....	24
Figura 2 – Pontos de Extração de solo	29
Figura 3 – Solos utilizados nos ensaios	30
Figura 4 – Jazida de extração de solo (Rio de Janeiro)	31
Figura 5 – Aplicação da cal sobre o solo 1	31
Figura 6 – Perfil do solo de Saltinho - SP	33
Figura 7 – Cal calcítica e cal dolomítica, respectivamente	35
Figura 8 – Resultados dos ensaios de pH	37
Figura 9 – Molde utilizado para compactação dos corpos de prova	39
Figura 10 – Homogeneização até 10% de umidade	40
Figura 11 – Mistura seca (Solo 1 + cal)	40
Figura 12 – Homogeneização por 1 hora para moldagem.....	41
Figura 13 – Escarificação entre as camadas	41
Figura 14 – Nivelamento do corpo de prova	42
Figura 15 – Desmoldagem com martelo de borracha.....	42
Figura 16 – Verificação das medidas de moldagem.....	43
Figura 17 – Pesagem do corpo de prova	43
Figura 18 – Corpos de prova preparados para cura úmida	44
Figura 19 – Pesagem anterior ao início dos ciclos	44
Figura 20 – Corpos de prova imersos em água	45
Figura 21 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão simples.....	46
Figura 22 – Evolução de ruptura mistura solo-cal (S1 - 3% CC).....	52
Figura 23 – Resistência à compressão simples – Solo 1 com adição de cal calcítica	53
Figura 24 – Resistência à compressão simples – Solo 1 com adição de cal dolomítica	54
Figura 25 – Resistência à compressão simples – Solo 1	55
Figura 26 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados do solo 1	56
Figura 27 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas (S1).....	57
Figura 28 – Estado físico dos corpos de prova no 6º ciclo.....	60
Figura 29 – Estado físico dos corpos de prova no 12º ciclo.....	61
Figura 30 – CP 3 com adição de 3% CD, após o 1º ciclo de molhagem e secagem	62

Figura 31 – Diferença entre os CPs com adição de 3% de cal, calcítica e dolomítica, respectivamente	63
Figura 32 – Corpos de prova solo 2 + 3%CD (9º ciclo de molhagem e secagem).....	63
Figura 33 – Corpos de prova solo 2 + 5%CD (12º ciclo de molhagem e secagem).....	64
Figura 34 – Corpos de prova após 38 dias de cura úmida.....	65
Figura 35 – Resistência à compressão simples – Solo 2 com adição de cal calcítica	66
Figura 36 – Resistência à compressão simples – Solo 2 com adição de cal dolomítica	67
Figura 37 – Resistência à compressão simples – Solo 2	68
Figura 38 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados do solo 2	69
Figura 39 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas (S2).....	70
Figura 40 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados das misturas estudadas.....	72
Figura 41 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas para as misturas estudadas.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Lovato (2004)	26
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Marcon (1977)	27
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Núñez (1991)	28
Tabela 4 – Localização dos solos estudados	29
Tabela 5 – Caracterização do Solo 1	32
Tabela 6 – Caracterização do Solo 2	34
Tabela 7 – Caracterização das cales	36
Tabela 8 – Parâmetros de compactação para solo 1	38
Tabela 9 – Parâmetros de compactação para solo 2	38
Tabela 10 – Misturas solo-cal.....	38
Tabela 11 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S1 – CC).....	48
Tabela 12 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S1 – CC).....	49
Tabela 13 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CC	49
Tabela 14 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CC	49
Tabela 15 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CD	50
Tabela 16 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CD	50
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 3%CC)	51
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 5%CC)	51
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 3%CD)	52
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 5%CD)	53
Tabela 21 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S2 – CC).....	58
Tabela 22 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S2 – CD)	58
Tabela 23 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CC	58
Tabela 24 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CC	59
Tabela 25 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CD	59
Tabela 26 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CD	60
Tabela 27 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 3%CC).....	61
Tabela 28 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 5%CC).....	62
Tabela 29 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 3%CD).....	64
Tabela 30 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 5%CD).....	65
Tabela 31 – Resumo dos valores obtidos para durabilidade das misturas estudadas	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

BaO – Óxido de Bário

CaO total – Óxido de Cálcio total

CC – Cal calcítica

CD – Cal dolomítica

Cl – Cloro

CO_2 – Dióxido de Carbono

CP – Corpo de prova

CSH – Hidrato de silicato de cálcio

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro

GC – Grau de compactação

IP – Índice de Plasticidade

K_2O – Óxido de Potássio

LageoTEC – Laboratório de Geotecnologia da UFRGS

LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MgO – Óxido de Magnésio

MnO – Óxido de Manganês

NBR – Norma Brasileira

Na₂O – Óxido de Sódio

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

PPC – Perda por combustão

Q_r – Quociente de resistência

R² – Coeficiente de determinação do modelo

RCS – Resistência à compressão simples

S1 – Solo 1 – Solo do estado do Rio de Janeiro

S2 – Solo 2 – Solo do estado de São Paulo

S – Enxofre

SiO₂ – Silicato

SrO – Monóxido de Estrôncio

TiO₂ – Dióxido de Titânio

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ZnO – Óxido de Zinco

ZrO₂ – Dióxido de Zircônio

ω_{ót} – Teor de umidade ótimo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS	18
2.1.1	Tipos de solos aptos para melhoramento e estabilização por cal	18
2.2	PROPRIEDADES DA CAL	19
2.2.1	Tipos de cal e suas respectivas propriedades	20
2.3	MISTURAS SOLO-CAL	21
2.3.1	Solo melhorado e solo estabilizado com cal	21
2.3.2	Mecanismos de estabilização de solos com cal	22
2.3.3	Comportamento da base estabilizada com cal como camada de pavimento	23
2.4	DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	SOLOS	29
3.1.1	Solo 1: Rio de Janeiro	30
3.1.2	Solo 2: São Paulo	33
3.2	CALES	35
3.3	DEFINIÇÃO DAS MISTURAS SOLO-CAL	36
3.4	ENSAIO DE DURABILIDADE	39
4	RESULTADOS	48
4.1	SOLO DO RIO DE JANEIRO (S1)	48
4.2	SOLO DE SÃO PAULO (S2)	57
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOLOS ESTUDADOS	71
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

No primeiro capítulo apresenta-se uma contextualização do problema de pesquisa, e a justificativa pela qual esse estudo é importante. Os objetivos, tanto geral quanto específicos, também são apresentados, assim como a estrutura adotada para o estudo.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O transporte de pessoas e de carga, no Brasil, é realizado principalmente por meio de rodovias, gerando elevadas solicitações aos pavimentos. Portanto, faz-se necessário um dimensionamento eficaz. O número de rodovias deve atender à demanda solicitada, bem como elas devem resistir as solicitações por um tempo de vida útil considerado longo.

Novas técnicas para melhoria do pavimento estão sendo constantemente estudadas. As melhorias podem ser feitas não somente na camada de rolamento, mas também nas demais, como na base. Com uma base pouco deformável e devidamente estabilizada sobre a qual o pavimento será executado, evita-se a ocorrência precoce de graves patologias, como a abertura de trincas e fissuras ou o afundamento do pavimento.

O emprego de um estabilizador, como a cal, nas camadas de solo é uma das soluções adotadas para dar maior estabilidade ao pavimento. A cal modifica as propriedades mecânicas e volumétricas dos solos, tornando a camada mais durável e estável. No caso de solos argilosos (mesmo misturados com areias e siltes), a cal apresenta vantagens técnicas e econômicas em relação a outros estabilizantes, como o cimento Portland.

Tem-se uma economia financeira com o uso do solo já disponível no local, dispensando a troca do material por outro com melhores características, e evitando-se o custo com transporte. A adição de cal é um tratamento para solos já usado em campo no Brasil, porém sem normatização. É um tratamento que reduz a deformabilidade tornando a vida útil do pavimento mais longa.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho estão classificados em geral e específicos e são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi verificar a durabilidade de misturas solo-cal.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram atingidos com a realização dos ensaios de durabilidade no laboratório LAGEOTEC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por meio de uma adaptação do Método Iowa de ensaio de Durabilidade.

- a) Adaptar o Método Iowa para avaliação da durabilidade em laboratório;
- b) Avaliar o comportamento de diferentes tipos de solos quanto a durabilidade quando adicionada cal;
- c) Avaliar a influência do tipo de cal na mistura;
- d) Determinar o efeito do teor de cal nas misturas ensaiadas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, cujos conteúdos são descritos resumidamente a seguir. Nesse primeiro capítulo foram apresentados o problema de pesquisa, a relevância do estudo e os objetivos que se visou alcançar por meio da realização do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca dos conceitos básicos de solos melhorados e solos estabilizados, mecanismos de estabilização de solos com cal e a forma como o solo já estabilizado se comporta como camada de pavimento. Neste mesmo capítulo aborda-se sobre a durabilidade de misturas solo-cal.

Os materiais empregados na pesquisa estão apresentados no capítulo 3. Nesse capítulo descreve-se o método de ensaio de durabilidade utilizado, com detalhes.

Os resultados dos ensaios, assim como as análises realizadas, são apresentados no capítulo 4. E por fim, no capítulo 5, explicita-se as conclusões obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas definições relacionadas à estabilização e melhoramento de solos com adição de cal. As características, tanto do solo quanto da cal, que influenciam na durabilidade dessas misturas têm maior ênfase neste estudo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

Para Engenharia Civil, solo é todo material não cimentado ou fracamente cimentado de partículas minerais oriundas da decomposição das rochas (SOUZA, 2014). É importante ter conhecimento das propriedades do solo, visto que todas as obras de engenharia têm sua base construída em um terreno do qual se espera a capacidade de absorver os esforços atuantes nas estruturas, de forma natural ou modificada.

2.1.1 Tipos de solos aptos para melhoramento e estabilização por cal

A base ou sub-base de solo-cal é indicada quando existe a necessidade de se atender às condições exigidas para uma determinada camada do pavimento. Desse modo, o solo deve ser devidamente homogeneizado, compactado e coberto com uma camada de rolamento, apresentando boa resposta para suporte das cargas aplicadas decorrentes da ação do tráfego (SENÇO, 2001).

É de vital importância o estudo do material sobre o qual será construída uma estrada. Quando o solo não tem grande capacidade de suporte, uma das maneiras de minimizar o problema é fazendo o tratamento dessa camada. A aplicação da cal é uma das soluções mais adotadas e que se mostra eficiente. Para que a modificação com cal funcione, o solo deve ter algumas características e propriedades específicas, visto que ele é parte importante das reações de estabilização.

Mateos (1964 *apud* NÚÑEZ, 1991) mostrou que a adição de cal reduz o peso específico aparente seco máximo e aumento o teor de umidade ótimo do solo. O retardo no tempo de compactação da mistura solo-cal acentua esses efeitos. Igualmente constatou que em solos ricos em montmorilonita a adição de cal distorce a curva de compactação.

Ao relatarmos os resultados das reações entre hidróxido de cálcio e diversos argilominerais, Eades e Grim (1960 *apud* NÚÑEZ, 1991) observaram que: a) a caolinita e a cal reagem

facilmente; b) a illita e a montmorilonita precisa de um maior teor de cal para início das reações; c) o difratograma de raios-X de misturas caolinita-cal mostra a formação de silicato hidratado de cálcio (CSH) em torno de um núcleo de argimíneral, sendo que o ataque da cal proporciona ganhos imediatos de resistência à caolinita, para a illita e a montmorilonita esses ganhos somente acontecem após a saturação das camadas com íons cálcio e a destruição de argilomineral. A fração de argila é considerada a principal fonte de sílica e alumina de um solo, mas os minerais presentes no silte também podem servir como fonte (THOMPSON, 1966).

Segundo Celauro *et al.* (2012) alguns parâmetros devem ser considerados quando da verificação da aptidão do solo à cal. Esses parâmetros são descritos como sendo a distribuição granulométrica, a plasticidade, o conteúdo de substâncias potencialmente disruptivas, o teor de umidade, a densidade *in situ*, bem como a presença de elementos grandes capazes de dificultar o processo de mistura durante a construção ou de impossibilitar sua aplicação devido ao seu custo.

Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que, com a adição de cal, o limite de plasticidade (LP) aumenta e o limite de liquidez (LL) normalmente diminui, embora possa se observar o efeito contrário em alguns solos. Geralmente, mas não sempre, o LL é reduzido nas argilas mais plásticas e aumentado em solos menos plásticos. De qualquer forma, o índice de plasticidade (IP) é usualmente reduzido com a adição de pequenos teores de cal. Entretanto, o IP de solos pouco plásticos pode sofrer um ligeiro aumento, embora os autores salientem que essa ocorrência é muito rara.

Hilt e Davidson (1960 *apud* NÚÑEZ, 1991) constataram que havia grandes aumentos no LP de solos argilosos. O efeito é mais acentuado em solos contendo montmorilonita, ao passo que aqueles que continham caolinita eram pouco afetados.

2.2 PROPRIEDADES DA CAL

A cal é um aglomerante mineral, muito utilizada na construção civil e na área de pavimentação. É um dos métodos de estabilização e melhoramento de solos. Tem por função principal aumentar a qualidade e a durabilidade do produto final, portanto, é um aditivo importante, e por vezes, essencial.

2.2.1 Tipos de cal e suas respectivas propriedades

A definição de cal hidratada, na NBR 7175 (ABNT, 2003), é pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. A cal hidratada é resultante do tratamento da cal virgem com uma quantidade de água suficiente para satisfazer sua afinidade química para com a água, sob as condições de hidratação (AZEVEDO, 2010).

O teor de cálcio é a característica química mais importante da cal. O cálcio em questão pode ocorrer livre na forma de óxido de cálcio, no caso da cal virgem, ou de hidróxido de cálcio, no caso da cal hidratada; ou combinado, na forma de carbonatos, silicatos e aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos. A presença de carbonatos pode estar associada à existência de calcário de origem ou a recarbonatações por contato com o ar. A soma do cálcio livre e combinado constitui a totalidade de cálcio existente na cal (SILVA, 2010).

A superfície específica é uma das características físicas mais importantes da cal, visto estar diretamente relacionada com algumas das suas propriedades tais como a facilidade de homogeneização e de reação da cal com o solo, por exemplo (BOYNTON, 1980 *apud* SILVA, 2010). A granulometria da cal, que também é uma característica física, influencia outras propriedades da cal tais como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura, quando usada na estabilização de solos (SILVA, 2010).

A reatividade da cal está relacionada com a eficiência e rapidez da sua ação estabilizante e está associada a outras características físicas e químicas, nomeadamente com a superfície específica. Este parâmetro permite prever a duração das reações e, no caso destas serem exotérmicas, o aumento de temperatura produzido. A cal calcítica possui uma maior reatividade do que a cal dolomítica (CRISTELO, 2001).

Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal – virgem e hidratada – está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo no mundo. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante (CUNHA, 2007 *apud* BUENO, 2011).

Em termos de pavimentação rodoviária, a cal mais empregada é a cal hidratada, estando substituindo a cal virgem devido as facilidades de uso (AZEVEDO, 2010). Em nosso país, existem poucas experiências com a utilização da cal para construção de camadas de pavimento, e destas poucas, uma minoria é significativa, sem contribuições a resultados ou proposta de uso (SENÇO, 2001).

A cal tem muitas qualidades como aditivo para uso na base ou sub-base, já vistos anteriormente. Porém pode ser usada na camada de rolamento, trazendo os seguintes benefícios: a diminuição dos danos por umidade e envelhecimento, isto porque a cal é um melhorador de adesividade de misturas asfálticas destinadas a execução de pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al, 2008).

Porém Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que não há, aparentemente, um teor ótimo de cal, que produza a máxima resistência em um solo estabilizado. Apontaram o teor e tipo de cal, o tipo de solo, o peso específico, o tempo e tipo de cura, como sendo os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal. O teor de cal depende das características do solo.

2.3 MISTURAS SOLO-CAL

Solo-cal é a uma mistura íntima, executada na pista ou em laboratório, composta por solo, cal e água, adequadamente compactada e submetida a um processo eficiente de cura. Cada mistura tem sua particularidade dependendo da combinação do solo com a cal escolhida.

2.3.1 Solo melhorado e solo estabilizado com cal

As misturas compostas por solo e cal podem ser do tipo: melhoradas ou estabilizadas. No caso do melhoramento com a cal, os teores adicionados são baixos, e verificam-se melhorias na trabalhabilidade e sensibilidade do solo com a água (plasticidade, granulometria e compactação). Na estabilização os teores adicionados são mais altos e verificam-se melhorias relevantes em longo prazo (resistência mecânica, durabilidade e permeabilidade) (CRISTELO, 2001).

Os solos estabilizados com cal, designam as misturas de solo e aditivo que apresentam durabilidade e resistência que permitem seu emprego como camada de base de um pavimento

rodoviário. O solo melhorado com cal é aquele em que a mistura, devido ao pequeno teor de estabilizante, não apresenta características para uso na base, mas que experimenta melhorias em outras propriedades mecânicas, tais como plasticidade, variação volumétrica e capacidade de suporte (NÚÑEZ, 1991).

Quando o solo é misturado com a cal, há uma redução da plasticidade do solo, resultando na melhoria de algumas características. As reações químicas imediatas dessa mistura acarretam floculação e troca catiônica, responsáveis pela melhoria da trabalhabilidade; e as reações lentas (ação cimentante da cal) são oriundas de reações pozolânicas e da carbonatação (BERNUCCI *et al.*, 2010; THOMPSON, 1967).

Ressalta-se que as cales dolomítica e calcítica resultam, quando incorporadas ao solo, em resistências finais praticamente iguais, todavia, distinguem-se quanto ao tempo de ganho dessa resistência final (MATEOS; DAVIDSON, 1962 *apud* MARCON, 1977). Todavia, estudos realizados por Thompson (1967), demonstraram que a cal com elevado teor de cálcio se mostrou mais efetiva.

No uso das misturas solo-cal, outra vantagem é a possibilidade de mitigar impactos ambientais oriundos de obras de infraestrutura por meio do aproveitamento dos materiais existentes no local da obra independentemente de sua qualidade e adequabilidade ao projeto a ser implantado para construção de rodovias (CRISTELO, 2001; CELAURO *et al.* 2012; KLINSKY *et al.* 2013). Elimina-se também, a necessidade de um depósito destinado aos materiais não compatíveis.

2.3.2 Mecanismos de estabilização de solos com cal

Quando se adiciona cal em um solo fino, e há presença de água, quatro reações químicas principais são iniciadas: a troca catiônica e a floculação aglomeração, reações pozolânicas e carbonatação (BHATTACHARJA *et al.*, 2003 *apud* BEHAK, 2013).

A ocorrência destas reações não é simultânea. A troca catiônica, floculação-aglomeração ocorrem imediatamente e estão relacionadas com a ação rápida da cal na estabilização do solo, por isso chamadas de fase rápida. Seguidamente ocorrem as reações pozolânicas que são responsáveis pela influência a longo prazo da cal no mecanismo de estabilização. Por fim, dá-se a carbonatação, reação indesejada neste tipo de tratamento (BEHAK, 2013; SILVA, 2010).

A flocculação é responsável pelas alterações nas seguintes características geotécnicas do solo: granulometria, plasticidade, compactação, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata (SILVA, 2010). Hilt & Davidson (1960), Diamond & Kinter (1965) e Jawad et al. (2014) afirmam que a carbonatação pode prejudicar a resistência das misturas solo-cal, visto que os carbonatos, além de formarem cimentos fracos, eles também bloqueiam a ação pozolânica, e portanto, os ganhos normais de resistência. A temperatura de cura pode acelerar ou retardar o ganho de resistência dependendo do seu valor (PINTO, 1971).

As adições de cal e água no solo reagem formando compostos hidratados de cálcio, como por exemplo: silicatos de cálcio hidratados e os aluminatos de cálcio hidratados. Essas reações são decorrentes na presença da umidade, quando a cal reage com a sílica ou óxido de alumínio, originando alterações nas misturas que podem estabilizar a expansibilidade de solos. Eles agem como aglutinantes, unindo as partículas do solo, que antes não eram aproveitáveis na pavimentação (BALBO, 2010; THOMPSON, 1967; CELAURO *et al.*, 2012).

Celauro *et al.* (2012) ressaltam sobre a importância de a adição da cal ocorrer em um solo de ambiente fortemente básico ($\text{pH} \geq 12$), pois desse modo dissolvem-se progressivamente a sílica, o alumínio e os óxidos de ferro (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) que formam a argila e, na presença da água formam os compostos hidratados de cálcio. Paige-Green (2008) salienta que, em materiais tratados com a cal, a cal não reagida torna-se necessária a fim de manter o pH da mistura acima de 12, garantindo que os produtos da reação permaneçam estáveis.

2.3.3 Comportamento da base estabilizada com cal como camada de pavimento

O comportamento estrutural do pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, da rigidez destas e do subleito, assim como da interação entre as diferentes camadas existentes na composição do pavimento (BERNUCCI et al, 2010).

Ao empregar solo-cal como sub-base ou base de um pavimento, deve-se atentar aos efeitos provocados pelas ações do tráfego e do clima, principalmente da influência da água nessa camada. Tendo em vista as condições severas de molhagem e secagem as quais o pavimento é submetido, é importante avaliar a durabilidade da camada de solo-cal a partir de ensaios que simulem essas condições. Em razão dos estudos com essas misturas serem pouco difundidos no país e de extrema necessidade, e considerando a possibilidade de gerar

pavimentos mais duráveis e resistentes, sem a necessidade da troca do material encontrado *in loco*.

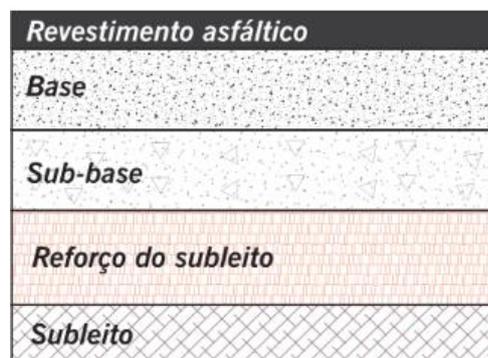
Thompson (1975 *apud* NÚÑEZ, 1991) relatou que dados de campo indicam que a resistência de algumas misturas de solo e cal continua aumentando com o passar do tempo, por períodos de 10 ou mais anos. Porém não mantém o ritmo de crescimento constante. Valores de dados experimentais mostram que a resistência cresce por longos períodos apesar de que somente 50% se desenvolve no primeiro mês (MATEUS, MANUEL e DAVIDSON, 1962).

Remus e Davidson (1961 *apud* NÚÑEZ, 1991)) observaram que a adição de cal dolomítica proporciona maior resistência a solos que contém illita e montmorlonita, ao passo que para solos que contém caolinita, a adição de cal calcítica ou dolomítica conduz a idênticos resultados. Constataram, entretanto, que a porcentagem de cal dolomítica, necessária para que o solo atinja a máxima resistência, é maior do que a porcentagem de cal calcítica.

Ormsby e Kinter (1973 *apud* NÚÑEZ, 1991), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita a adição de cal calcítica dá maiores resistências do que a dolomítica, sendo a RCS função linear do teor de cal adicionado. Já para solos contendo montmorilonita a relação é uma equação do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal com maior teor de óxido de magnésio (dolomítica).

Na Figura 1 tem-se a estrutura de um pavimento-tipo flexível, onde percebe-se que a camada do revestimento asfáltico tem sua deformação dependente das camadas inferiores. A deformação controlada da base resulta no menor aparecimento de patologias na camada de rolamento.

Figura 1 – Estrutura de pavimento-tipo flexível



2.4 DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL

Para Lovato (2004) a durabilidade de misturas solo-cal é estabelecida como a capacidade de um material de manter sua integridade estrutural a determinadas condições a que é exposto. Em laboratório, ela pode ser estipulada por meio da perda de peso e resistência resultante de ciclos de molhagem e secagem, visando desse modo, simular as condições do material em campo, que está exposto ao intemperismo natural.

As condições a que o material estabilizado é exposto em laboratório durante ensaios de durabilidade, tem por finalidade simular as condições ambientais de campo. Por isso é importante que os métodos de durabilidade levem em conta parâmetros como a ocorrência de chuvas, temperatura local, umidade do ar e temperatura das camadas do pavimento. Este último fator é importante tendo em vista que nos processos de estabilização dos solos em que intervêm reações químicas, a velocidade do ganho de resistência é função da temperatura (PINTO, 1971; MARCON, 1977).

Quando expostas ao intemperismo, as misturas solo-cal têm sua resistência influenciada pelo teor e tipo de cal, além de outros fatores como o tipo de solo, tempo de cura e energia de compactação da mistura (NÚÑEZ, 1991; HERRIN, MITCHELL, 1961). Núñez (1991) ainda indica que a durabilidade das misturas aumenta proporcionalmente ao tempo de cura e energia de compactação. Thompson (1967) salienta a importância da cura no aumento da resistência da mistura visando compensar os efeitos do carregamento repetido (fadiga).

A durabilidade está relacionada com a permanência de estabilizantes químicos e com a habilidade das partículas de solo e estabilizantes permanecerem juntos e intactos por um longo período de tempo (PUPPALA, 2016). A avaliação da durabilidade de misturas solo-cal é feita geralmente a partir de ensaios de molhagem e secagem e de congelamento e degelo, embora esse último não seja exigido em regiões tropicais e sub-tropicais.

Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que, geralmente, a durabilidade de misturas de solo e cal, no campo, tem sido satisfatória. Embora, não seja consistente com os resultados de certos ensaios de laboratório, que predizem, repetitivamente, fracos desempenhos. Supostamente, as misturas de solo e cal, quando protegidas do intemperismo por uma camada de revestimento asfáltico, são mais duráveis do que indicam a maioria dos ensaios de laboratório.

Muitos métodos de avaliação de durabilidade de materiais estabilizados com cal têm sido estudados. Pode-se destacar: perda de peso por abrasão, absorção de água, velocidade de propagação de pulsos, variação de volume e medidas de resistência. Os métodos mais comuns de laboratório são perda de peso e/ou perda de resistência para corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem ou gelo-degelo (MARCON, 1977).

Núñez (1991) afirma que o ensaio de durabilidade padronizado pelo método SC-3 da ABCP (1986), permite determinar a perda de peso, por escovamento, de corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Contudo esse método mostrou ser muito severo para avaliar a durabilidade de misturas de solo e cal. O escopo do método Iowa, proposto por Hoover, Handy e Davidson (1958) não contempla o escovamento dos corpos de prova.

Não existe nenhuma normativa brasileira com critério para a avaliação de durabilidade por perda de resistência. Todavia, Lovato (2004) indica a avaliação de Iowa para corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, onde se consideram satisfatórias misturas que possuam uma razão de resistência de no mínimo 80%. Denota-se que a razão é expressa pela relação entre a resistência à compressão obtida pelos corpos de prova submetidos à molhagem e secagem, pela resistência de corpos de prova curados normalmente.

Lovato (2004) explicita os resultados para um solo laterítico estabilizado com cal. Neste estudo foram realizados apenas seis ciclos de molhagem e secagem. Metade dos corpos de prova iniciaram o ciclo pela molhagem e a outra metade pela secagem. Na Tabela 1 é possível perceber que a média das resistências dos CPs que iniciaram com a secagem é maior, essa é uma das recomendações do Método Iowa.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Lovato (2004)

Teor de cal (%)	RCS (kPa)			Quociente de resistência (Molhagem 1°)	Quociente de resistência (Secagem 1°)
	CP com ciclos (Molhagem 1°)	CP com ciclos (Secagem 1°)	CP sem ciclos		
4	2082	2289	2994	0,7	0,76
5	2642	3085	3581	0,74	0,86

Fonte: adaptado de LOVATO (2004)

Marcon (1977) estuda misturas que não levam exclusivamente solo e cal. Nesta pesquisa o

solo estudado foi uma areia de duna costeira. Adotaram-se 3 misturas, a mistura 1 é composta por 83% de areia de duna, 13% de cinza volante e 4% de cal. A mistura 2 possui os mesmos teores da primeira com respeito à cal, cinza volante e areia de duna, mas é feita a adição de 1% de cimento Portland de alta resistência inicial. A mistura 3 é composta por 53% de areia de duna, 30% de brita, 4% de cal, 13% de cinza volante e mais 1% de cimento Portland de alta resistência inicial.

A mistura 1, segundo o método Iowa, é a única que não satisfaz o critério de durabilidade, onde o quociente de resistência deve estar acima de 0,80. Esta mistura já possuía a menor resistência quando rompida aos 14 dias, sem os ciclos. As misturas que contém cimento Portland de alta resistência inicial, como visto na Tabela 2, têm valores bem superiores de resistência. A adição de agregado graúdo também é uma variável a ser levada em consideração nas misturas.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Marcon (1977)

Mistura	RCS (kPa)			Quociente de resistência
	Sem ciclos (14 dias de cura)	Após 12 ciclos		
		Sem ciclos	Com ciclos	
1	333,43	2432	1697	0,70
2	1127,77	4335	3638	0,84
3	3765,75	8659	8002	0,92

Fonte: adaptado de MARCON (1977)

Núñez (1991) realizou os ensaios de durabilidade segundo o método Iowa, e na Tabela 3 tem-se os resultados obtidos. Percebe-se por meio desses resultados que existe uma falha no método, onde apenas a relação entre os valores de resistência é considerado, e não existem valores mínimos de resistência a ser considerados de acordo com a camada onde será aplicada a cal. Na Tabela 3 fica claro que os valores de resistência são bem inferiores aos demais estudos apresentados. Quanto ao critério de durabilidade, o solo é considerado durável, e atinge valores acima de 100% quando adiciono 9% de cal.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de durabilidade por Núñez (1991)

Teor de cal (%)	RCS (kPa)		Quociente de resistência
	CP com ciclos	CP sem ciclos	
5	315	366	0,89
9	372	346	1,08

Fonte: NÚÑEZ (1991)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são especificados os materiais empregados nas misturas – os solos e as cales. Após, está apresentado o método de ensaio de durabilidade adotado nessa pesquisa.

3.1 SOLOS

Os solos estudados neste trabalho foram escolhidos principalmente devido sua aplicabilidade. São solos com características próprias de duas regiões. A técnica de melhoramento das propriedades desses solos a partir da adição de cal já é realizada pelas concessionárias, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Localização dos solos estudados

LOCALIZAÇÃO DOS SOLOS		
Solo	Rodovia	Município próximo
Solo 1 (S1)	BR-101	Silva Jardim - RJ
Solo 2 (S2)	SP-127	Saltinho - SP

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

Os solos foram fornecidos pelas concessionárias das respectivas rodovias. A localização das cidades de onde extraíram-se os solos são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Pontos de Extração de solo



Fonte: adaptada de Google Maps (2018)

Os solos, para fins didáticos, foram identificados neste trabalho como:

- Solo 1 (S1): solo de Silva Jardim – Rio de Janeiro;
- Solo 2 (S2): solo de Saltinho – São Paulo.

Na Figura 3 são apresentados os solos de Silva Jardim – Rio de Janeiro e o solo de Saltinho – São Paulo, respectivamente. Inicialmente já se percebe a diferença de coloração.

Figura 3 – Solos utilizados nos ensaios



Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

3.1.1 Solo 1: Rio de Janeiro

O primeiro solo ensaiado foi coletado em uma jazida no município de Silva Jardim, que fica nas Baixadas Litorâneas, no estado do Rio de Janeiro. Segundo Kleinert (tese em andamento), o solo foi classificado em Argissolo Vermelho Amarelo.

Na Figura 4 pode-se observar como foi realizada a coleta do material utilizado nesta pesquisa. Se tomou o cuidado de retirar todo solo da mesma estaca, para que as propriedades do solo variassem minimamente. A amostra coletada foi, portanto, a mais representativa possível da região onde o estudo pode ser efetivamente usado. Na Figura 5 observa-se a aplicação da cal sobre o solo a fim de modificar suas propriedades.

Figura 4 – Jazida de extração de solo (Rio de Janeiro)



Fonte: Guilherme Campos – Engenheiro da Belocal (2017)

Figura 5 – Aplicação da cal sobre o solo 1



Fonte: KLEINERT (2018)

No estado do Rio de Janeiro, parte do traçado da rodovia BR-101 está localizado sobre esse solo, sendo que sua modificação a partir da adição de cal é uma alternativa que já vem sendo empregada para viabilizar seu uso como reforço do subleito e sub-base. Logo após a coleta do solo, o mesmo foi transportado para Porto Alegre, Rio Grande do Sul, para realização dos ensaios. Foi armazenado no LAPAV- UFRGS. As características deste solo podem são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do Solo 1

CARACTERIZAÇÃO DO SOLO		
Propriedade	Solo 1	
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,675	
Granulometria	Argila (%)	14,0
	Silte (%)	37,0
	Areia fina (%)	8,0
	Areia média (%)	12,6
	Areia grossa (%)	26,3
	Pedregulho (%)	2,1
	Classificação NBR 6502 (ABNT, 1995)	Areia siltosa
Plasticidade	Limite de Liquidez - LL (%)	47
	Limite de Plasticidade - LP (%)	30
	Índice de Plasticidade - IP (%)	17
	Classificação Burmister (1949 apud DAS, 2007)	Plasticidade média
Classificação	AASHTO	A-7-5
	Índice de Grupo - IG	7
	SUCS (sigla)	SM-ML
	SUCS (nomenclatura)	Silte arenoso de baixa compressibilidade

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

Por Kleinert (tese em andamento), foram realizados ensaios de caracterização do solo. Referente a massa específica real dos grãos seguiu-se o preconizado pela NBR 6508 (ABNT, 1984). A granulometria do mesmo foi realizada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016) a partir do ensaio de sedimentação para verificação da distribuição granulométrica dos finos (< 0,075 mm) e do peneiramento manual do material retido na peneira #200 (0,075 mm).

Os limites de Atterberg foram realizados a partir da determinação do limite de plasticidade (LP) pela NBR 7180 (ABNT, 2016) e da determinação do limite de liquidez (LL) pela NBR 6459 (ABNT, 2016). O solo apresentou LL de 47% e LP igual a 30%, resultando em um índice de plasticidade (IP) de 17, sendo considerado de média plasticidade. Dessa forma, ele é classificado como A-7-5 pela classificação AASHTO, conforme apresentado pela normativa do DNIT (2006).

3.1.2 Solo 2: São Paulo

O segundo solo foi extraído na cidade de Saltinho, no estado de São Paulo, e encaminhado para Porto Alegre, para que seu estudo fosse realizado. É um solo com alto índice de plasticidade, classificado como Luvissole Háplico (KLEINERT, tese em andamento). Na Figura 6, o perfil do solo em questão é mostrado com maiores detalhes.

Figura 6 – Perfil do solo de Saltinho - SP



Fonte: Guilherme Campos – Engenheiro da Belocal (2017)

Os resultados são apresentados resumidamente na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização do Solo 2

CARACTERIZAÇÃO DO SOLO		
Propriedade	Solo 2	
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,702	
Granulometria	Argila (%)	52,0
	Silte (%)	41,0
	Areia fina (%)	3,0
	Areia média (%)	1,6
	Areia grossa (%)	1,2
	Pedregulho (%)	1,2
	Classificação NBR 6502 (ABNT, 1995)	Argila siltosa
Plasticidade	Limite de Liquidez - LL (%)	69
	Limite de Plasticidade - LP (%)	41
	Índice de Plasticidade - IP (%)	28
	Classificação Burmister (1949 apud DAS, 2007)	Plasticidade alta
Classificação	AASHTO	A-7-5
	Índice de Grupo - IG	20
	SUCS (sigla)	MH
	SUCS (nomenclatura)	Silte de alta compressibilidade

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

Da mesma forma, e com as mesmas normas e métodos, foram realizados os ensaios de caracterização para o solo 2. Obteve-se um maior peso específico real dos grãos do que para o solo 1, no valor de 2,702 g/cm³. No laboratório também foram definidos através de ensaios os valores de LL igual a 69% e LP igual a 41%, resultando em um índice de plasticidade (IP) de 28. Comprovando-se se tratar de um solo com alta plasticidade.

3.2 CALES

As cales usadas como aditivo nas misturas solo-cal são de dois tipos: cal calcítica e cal dolomítica. A cal calcítica é produzida em Minas Gerais e tem alto teor de óxido de cálcio. E a cal dolomítica é produzida no Rio Grande do Sul. Conforme Guimarães (1997), a cor da cal indica se existem impurezas na sua composição. Portanto, quanto mais branca a cal, mais pura ela tende a ser, na Figura 7 percebe-se que a cal calcítica é branca e a cal dolomítica é cinza.

Figura 7 – Cal calcítica e cal dolomítica, respectivamente



Fonte: autora (2018)

Os ensaios de caracterização das cales foram realizados pela empresa Belocal – Grupo Lhoist. O ensaio de caracterização das cales, que foram utilizadas neste estudo, mostrou que os valores mais representativos de óxidos em sua composição, para cal dolomítica é de 31,1% de óxido de magnésio e 45,22% de óxido de cálcio. Para a cal calcítica tem-se 73,08% de óxido de cálcio, o valor do óxido de magnésio mostrou bem menos representativo quando comparado com a cal dolomítica. Na Tabela 7, estão os resultados desta caracterização.

Tabela 7 – Caracterização das cales

CAL DOMÍTICA		CAL CALCÍTICA	
PARÂMETROS	RESULTADO	PARÂMETROS	RESULTADO
	%		%
MgO	31,1	MgO	0,55
Al ₂ O ₃	0,41	Al ₂ O ₃	0,05
SiO ₂	3,02	SiO ₂	0,12
CaO total	45,22	CaO total	73,08
Fe ₂ O ₃	1,29	Fe ₂ O ₃	0,18
CO ₂	2,88	CO ₂	2,42
S	0,011	S	0,032
Na ₂ O	0,107	Na ₂ O	0
K ₂ O	0,375	K ₂ O	0
P ₂ O ₅	0,025	P ₂ O ₅	0,059
SrO	0,029	SrO	0,391
ZrO ₂	0,005	ZrO ₂	0,045
MnO	0,088	MnO	0
ZnO	0,007	ZnO	0
TiO ₂	0,048	TiO ₂	0
BaO	0,031	BaO	0
Cl	0,014	Cl	0,015
PPC	17,99	PPC	25,22

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

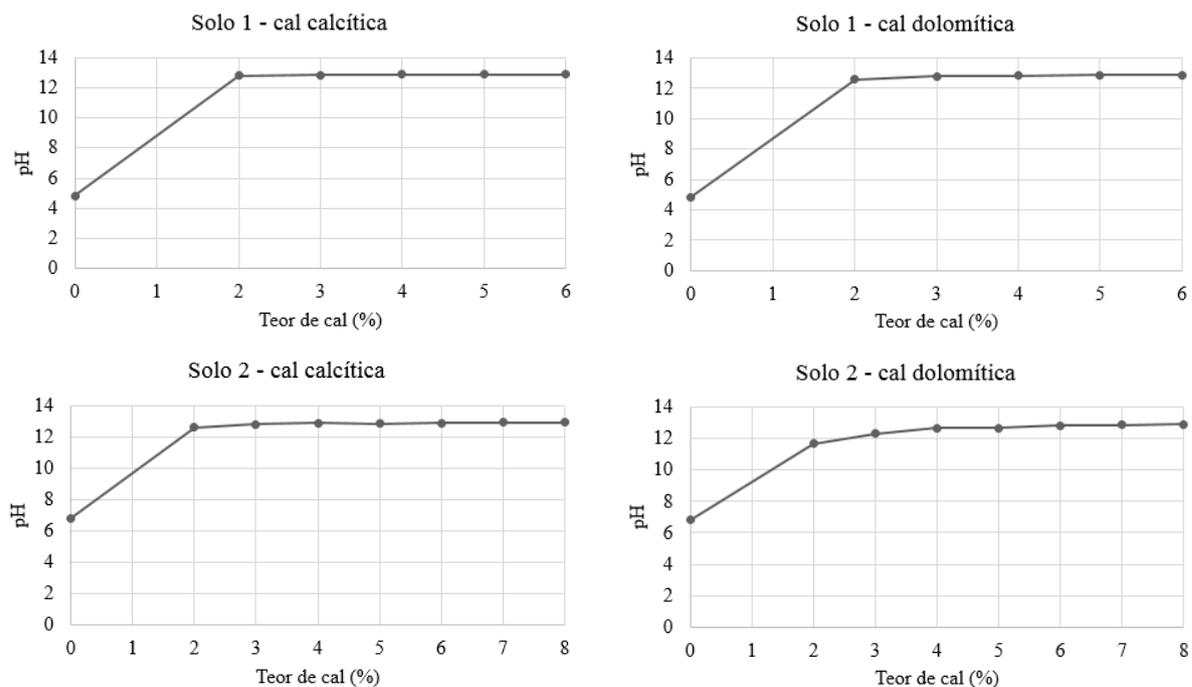
3.3 DEFINIÇÃO DAS MISTURAS SOLO-CAL

A dosagem das misturas solo-cal foi feita a partir de dois ensaios, o ensaio de pH (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006) e os Limites de Atterberg NBR 7180 (ABNT, 2016). Em laboratório foram realizados todos ensaios utilizados para definição do limite de liquidez e o limite de plasticidade, e conseqüentemente o índice de plasticidade.

Para o ensaio de pH, segundo a norma adotada, uma série de amostras foi preparada contendo uma variação de porcentagens de teor de cal no solo. Leituras de pH foram feitas em amostras em pasta para determinar o teor de cal mínimo da mistura solo-cal a fim de se obter um pH de no mínimo 12,4. Salienta-se que o pH de no mínimo 12,4 alcançado nesse método de ensaio resulta em cal livre remanescente na mistura solo-cal.

Conforme sugerido por Eades & Grim (1966), o teor necessário para estabilizar um solo com cal é o mínimo que consegue alcançar um pH de 12,4, e conforme Kleinert (tese em andamento), verificou-se que para o solo 1, com a adição de 2% de cal o pH resultante foi de 12,80, tendo pouca variabilidade até o maior teor de cal adicionado que foi de 6% (resultando em um pH de 12,89). Desse modo, conclui-se que a partir de 2% torna-se viável a incorporação de cal considerando o pH fortemente básico favorável a formação dos hidratados de cálcio da mistura solo-cal. Já para o solo 2 verificou-se que com a adição de 2% de cal o pH resultante foi maior que 12,4 para cal calcítica, e para cal dolomítica apenas com 4% se obteve um pH satisfatório. Na Figura 8, pode-se observar as curvas de pH obtidas nos ensaios que foram realizados com 2, 4 e 6% de cal.

Figura 8 – Resultados dos ensaios de pH



Fonte: adaptado de KLEINERT (tese em andamento)

Foram definidos os teores em 3 e 5% de cal, para ambas as cales. Estes teores foram adotados para os dois solos. Com a definição dos teores das cales foram caracterizadas as misturas através dos parâmetros de compactação com energia normal. Para os ensaios de compactação, foram moldados no mínimo cinco pontos para definição do teor umidade ótimo ($\omega_{ót}$) e a massa específica aparente seca máxima. Em relação a todos os ensaios tomou-se o cuidado de

misturar a cal e deixar a mesma reagindo com o solo com a umidade correspondente, por um período de uma hora. Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 8, para o solo 1 e na Tabela 9, para o solo 2.

Tabela 8 – Parâmetros de compactação para solo 1

Identificação	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	ω_{ot} (%)
S1	1,660	18,92
S1-3CC	1,579	21,20
S1-5CC	1,571	22,00
S1-3CD	1,598	21,80
S1-5CD	1,593	20,80

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

Tabela 9 – Parâmetros de compactação para solo 2

Identificação	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	ω_{ot} (%)
S2	1,435	28,00
S2-3CC	1,418	29,20
S2-5CC	1,414	28,40
S2-3CD	1,425	29,50
S2-5CD	1,421	28,30

Fonte: adaptada de KLEINERT (tese em andamento)

Na Tabela 10 define-se as misturas que foram estudadas, compostas pela combinação dos solos 1 e 2 com as cales calcítica e dolomítica. A quantidade de corpos de prova compactados foi definida com uma margem (moldagem de um corpo de prova extra), conforme pode ser visto no subitem 3.4 do presente trabalho.

Tabela 10 – Misturas solo-cal

MISTURAS SOLO-CAL			SOLO 1	SOLO 2
			Nº CPs	Nº CPs
CAL CALCÍTICA	Teor de cal	3%	7	7
		5%	7	7
CAL DOLOMÍTICA	Teor de cal	3%	7	7
		5%	7	7
Número total de CPs			56	

Fonte: autora (2018)

3.4 ENSAIO DE DURABILIDADE

Os solos utilizados na moldagem dos CPs submetidos ao ensaio de durabilidade foram secos ao ar e, posteriormente peneirados em uma peneira nº 10. As misturas, desses solos com cal, foram compactadas e submetidas ao ensaio de durabilidade proposto por Hoover, Handy e Davidson (1958), também conhecido como Método Iowa.

Corpos de prova de 5,00 cm de diâmetro e 10,00 cm de altura, de misturas solos-cal foram moldados por compactação dinâmica. Devido ao uso dessa forma de compactação, optou-se por moldar um corpo de prova extra para cada mistura, de modo que a primeira amostra fosse tomada como base para o número de golpes necessário. O molde usado é tripartido visando uma desmoldagem mais rápida e com menores prejuízos aos corpos de prova. São aceitos os valores de $10 \pm 0,2$ cm de altura e $5 \pm 0,2$ cm de diâmetro, após a desmoldagem. O molde utilizado na compactação, aberto e fechado, pode ser visto na Figura 8.

Figura 9 – Molde utilizado para compactação dos corpos de prova



Fonte: autora (2018)

As misturas foram compactadas nos teores de 3% e 5% de cal, valores definidos através dos Limites de Atterberg e do ensaio de pH. Os corpos de prova foram preparados com o teor ótimo de umidade e com o peso específico aparente seco máximo. Levando em consideração a curva de compactação das misturas, o solo 1 foi homogeneizado com o teor de 10% de umidade 24 horas antes de se adicionar a cal no solo (Figura 10), e se atingir a umidade ótima para moldagem. E para o solo 2, foram adicionados 18% de umidade no dia anterior a moldagem.

Figura 10 – Homogeneização até 10% de umidade



Fonte: autora (2018)

Tanto a cal calcítica quanto a dolomítica, o procedimento de mistura foi o mesmo. Após atingir a umidade indicada e homogeneizar por 24 horas, o solo recebeu a porcentagem de cal de acordo com a mistura, de 3 ou 5%. A mistura seca pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Mistura seca (Solo 1 + cal)



Fonte: autora (2018)

A mistura seca (solo+cal) recebeu a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima, e permaneceu reservada em um saco plástico fechado por 1 hora, após este período os corpos de prova foram moldados (Figura 12).

Figura 12 – Homogeneização por 1 hora para moldagem



Fonte: autora (2018)

A moldagem ocorreu em três camadas, e como mostrado na Figura 13, entre as camadas houve escarificação do solo a fim de que promovesse maior aderência entre as camadas.

Figura 13 – Escarificação entre as camadas



Fonte: autora (2018)

Após a compactação das três camadas, foi realizado o nivelamento (Figura 14), e o acabamento fino do corpo de prova, para facilitar o posterior rompimento do mesmo na prensa.

Figura 14 – Nivelamento do corpo de prova



Fonte: autora (2018)

A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após a compactação do mesmo (Figura 15). As medições e pesagem dos corpos de prova podem ser vistas nas Figuras 16 e 17. Foram tiradas duas medidas de altura e nove diâmetros para se obter a média, isso é feito principalmente pelo fato de o molde ser tripartido, que durante a compactação dinâmica podem sofrer pequenos deslocamentos.

Figura 15 – Desmoldagem com martelo de borracha



Fonte: autora (2018)

Figura 16 – Verificação das medidas de moldagem



Fonte: autora (2018)

Figura 17 – Pesagem do corpo de prova



Fonte: autora (2018)

Na sequência, os corpos-de-prova foram identificados e colocados em sacos plásticos, fechados e identificados para evitar troca de umidade com o ambiente (Figura 18). Os ciclos de molhagem e secagem ocorreram após uma cura úmida de 14 dias. A cura úmida foi realizada com uma temperatura de aproximadamente 23°C e superior a 95% de umidade relativa. A cura tem o intuito de garantir que os CPs adquiram resistência inicial para passarem pelos ciclos.

Figura 18 – Corpos de prova preparados para cura úmida



Fonte: autora (2018)

Para cada uma das misturas foram moldados sete corpos de prova. O primeiro corpo de prova foi usado como teste para o número de golpes necessários para cada camada, levando em consideração a altura. Cada camada deveria ter $1/3$ da altura total do corpo de prova. Do número total de CPs moldados, metade (mais o CP teste) foi submetida a 12 ciclos de molhagem e secagem, cada ciclo tem duração de 48 horas, isto é, sendo 24 horas de secagem ao ar e 24 horas de imersão em água potável. Antes de submeter esses CPs aos ciclos foi feita uma nova pesagem (Figura 19).

Figura 19 – Pesagem anterior ao início dos ciclos



Fonte: autora (2018)

Na Figura 20 tem-se a caixa usada para imersão dos corpos de prova. Essa caixa tem um estrado plástico no fundo, com altura de 2,5cm do fundo verdadeiro da caixa. O estrado tem como função permitir a absorção de água pela parte inferior dos corpos de prova.

Figura 20 – Corpos de prova imersos em água



Fonte: autora (2018)

Após os 12 ciclos de molhagem e secagem, os corpos de prova foram limpos com uma toalha para uma condição de superfície seca e testados quanto à resistência à compressão simples. O ensaio foi feito segundo o método ASTM D5102-09. Foi admitida uma variação em torno da resistência média de $\pm 10\%$ e cada valor de resistência correspondente ao rompimento de três corpos de prova, segundo Marcon (1977) é prática usual nas pesquisas de laboratório, referentes a estabilização de solos (ASTM C593-69).

As amostras foram ensaiadas com velocidade de deformação de 1,14mm/min, dentro do intervalo sugerido pela norma empregada (entre 0,5 e 2% por minuto), em uma prensa da marca Wykeham Farrance (Figura 21), com capacidade para 50kN. Para cada ruptura, a carga aplicada e a respectiva deformação formam uma curva, extraído-se dela portanto a carga de ruptura, onde determina-se a resistência à compressão simples dos corpos de prova.

Figura 21 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: autora (2018)

Por fim, avaliou-se a relação entre a resistência de misturas de solo-cal submetidas a ciclos de molhagem e secagem e a resistência dos CPs que ficaram apenas na cura úmida. O objetivo é que a relação entre as resistências seja de no mínimo 80%. As misturas que satisfizerem essa condição estarão aptas quanto à durabilidade.

A fim de verificar a significância dos fatores controlados (teor de cal, tipo de cal e processo de cura), realizou-se a análise fatorial dos resultados a partir do *software* estatístico Minitab. A análise da Variância é o método mais usado para se avaliar numericamente a qualidade de ajuste de um modelo. É necessária a análise dos resíduos para que se possa avaliar a qualidade do ajuste de modelo adotado para estudo. Se um modelo deixa resíduos consideráveis, ele é um modelo ruim (BARROS NETO, 2003).

Um dos parâmetros levado em consideração foi o R^2 , que é coeficiente de determinação do modelo. O valor máximo de R^2 é 1 (ou 100%), e só ocorrerá se não houver resíduo nenhum e, portanto, toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. Quanto mais perto de 1 estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo as respostas observadas (BARROS NETO, 2003). O intervalo de confiança considerado foi de 95%. Os valores de RCS com resíduo padronizado acima de 1,96 foram descartados da análise.

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados para as oito misturas solo-cal, composta por: dois solos (S1- Rio de Janeiro e S2 - São Paulo), duas cales (calcítica e dolomítica) e dois teores de cal (3% e 5%). Cada subcapítulo aborda um dos solos estudados, a fim de facilitar o entendimento.

4.1 SOLO DO RIO DE JANEIRO (S1)

Os resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem são apresentados em forma de tabelas e figuras. A análise de cada um dos itens foi realizada levando em consideração as condições gerais de execução dos ensaios, o método e os materiais e equipamentos utilizados.

Da análise de resultados, para a mistura solo-cal composta pelo solo 1 e a cal calcítica, não foi adicionada água extra como margem para perdas, portanto é a maior diferença entre o teor de umidade medido e o teor ótimo de água que foi usada na mistura. Esses valores podem ser observados na Tabela 11. Portanto, o valor da umidade ficou no ramo seco da curva de compactação, ficando abaixo da ótima.

Tabela 11 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S1 – CC)

MISTURA	UMIDADE OBTIDA	UMIDADE ÓTIMA	DIFERENÇA
3% CC	18,80%	21,20%	-2,40%
5% CC	19,79%	22,00%	-2,21%

Fonte: autora (2018)

No caso da mistura solo-cal com cal dolomítica, o valor da umidade medida ficou com uma diferença menor que 1% da úmida ótima. O resultado é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S1 – CC)

MISTURA	UMIDADE OBTIDA	UMIDADE ÓTIMA	DIFERENÇA
3% CD	22,21%	21,80%	0,41%
5% CD	20,52%	20,80%	-0,28%

Fonte: autora (2018)

Nas Tabelas 13 e 14, pode-se observar que houve variações nos valores de altura e diâmetro dos corpos de prova devido a compactação dinâmica. Bem como pode-se ver que o grau de compactação de todas as misturas ficou acima de 95%.

Tabela 13 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CC

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	369,95	5,02	10,09	99
2	380,00	5,02	10,09	102
3	381,10	5,03	10,08	102
4	380,90	5,02	10,08	102
5	381,50	5,02	10,08	102
6	381,30	5,03	10,02	102
7	379,60	5,02	10,10	101

Fonte: autora (2018)

Tabela 14 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CC

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	380,10	5,02	10,12	101
2	378,30	5,02	10,10	101
3	378,60	5,02	10,09	101
4	382,60	5,03	10,12	101
5	384,50	5,03	10,08	102
6	383,80	5,02	10,03	102
7	383,48	5,03	10,07	102

Fonte: autora (2018)

Os valores de GC do solo 1 com adição de cal dolomítica foram em média 3% inferior a mistura com cal calcítica. Contudo, como esperado, ficaram acima de 95% para todos os corpos de prova, nos dois teores. Os valores de grau de compactação estão apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Medidas e Grau de Compactação - 3% CD

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	382,81	5,02	9,92	100
2	382,60	5,02	10,03	99
3	382,80	5,02	10,04	99
4	382,75	5,01	10,04	99
5	383,20	5,02	10,06	99
6	381,51	5,02	10,06	98
7	385,93	5,02	10,05	99

Fonte: autora (2018)

Tabela 16 – Medidas e Grau de Compactação - 5% CD

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	373,50	5,01	10,16	97
2	383,94	5,03	10,08	100
3	372,03	5,01	10,08	98
4	377,46	5,02	10,14	98
5	378,46	5,02	10,06	99
6	375,23	5,01	10,12	98
7	374,79	5,02	10,12	97

Fonte: autora (2018)

As Tabelas 17 e 18 mostram os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, de onde foram extraídos os valores das cargas de ruptura de cada um dos corpos de prova. Os valores de RCS com adição de 5% de ambas as cales foi superior aos corpos de provas rompidos com apenas 3%. Os valores de ganho de massa representam a absorção de água pelos corpos de prova que ficaram em ciclo, foram valores bem coerentes e representativos.

Na Figura 22, pode-se ver a evolução da ruptura de um CP do solo 1 com adição de calcária.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 3%CC)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	3,5%	386	Com ciclos
CP 3	2,4%	513	
CP 5	2,8%	534	
CP 7	2,8%	505	
CP 2	0,2%	730	Sem ciclos
CP 4	0,0%	855	
CP 6	0,1%	818	

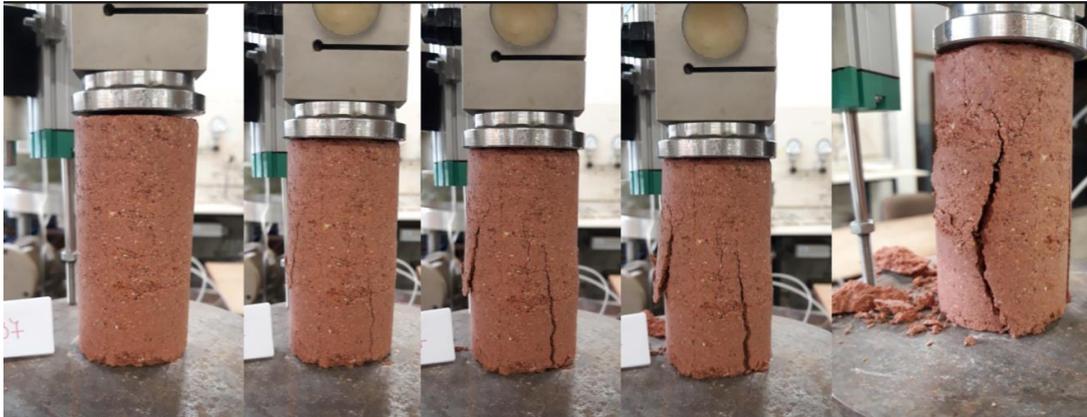
Fonte: autora (2018)

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 5%CC)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	2,5%	754	Com ciclos
CP 3	2,6%	743	
CP 5	2,0%	676	
CP 7	2,4%	705	
CP 2	0,1%	1001	Sem ciclos
CP 4	0,2%	989	
CP 6	-0,1%	1329	

Fonte: autora (2018)

Figura 22 – Evolução de ruptura mistura solo-cal (S1 - 3% CC)



Fonte: autora (2018)

Nas Tabelas 19 e 20 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples. Os valores de RCS dos corpos de prova que passaram pelos ciclos em ambas as cales foram inferiores aos que ficaram apenas na câmara úmida, para os dois teores. Os ciclos foram mais rigorosos com os CPs que receberam adição de cal dolomítica. Houve a perda de um corpo de prova teste durante os ciclos, o CP 1 – 3%CD, devido à má aderência entre a primeira e a segunda camada.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 3%CD)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	0,0%	0	
CP 3	3,1%	209	Com ciclos
CP 5	0,2%	215	
CP 7	3,6%	281	
CP 2	1,5%	387	Sem ciclos
CP 4	1,1%	422	
CP 6	0,2%	426	

Fonte: autora (2018)

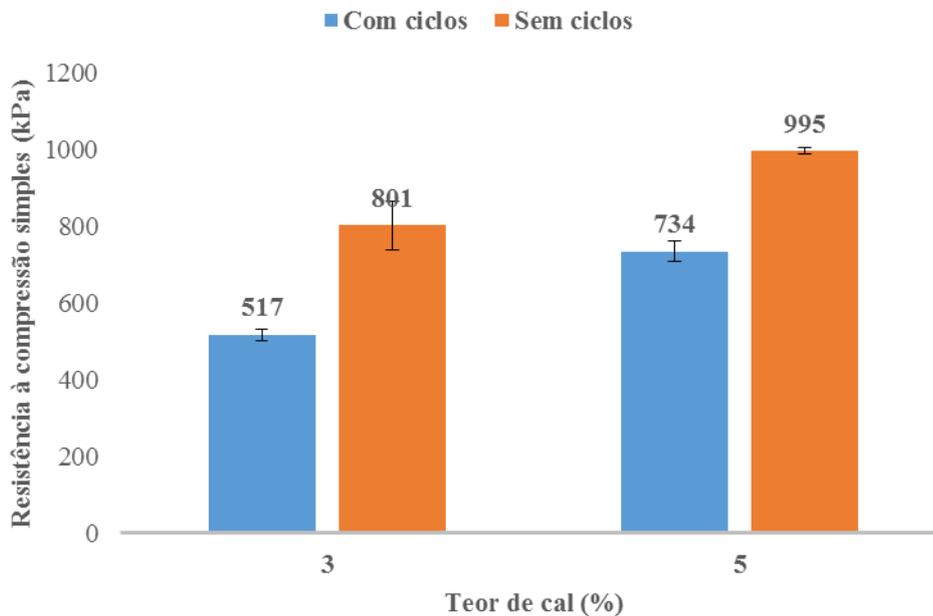
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples (S1 – 5%CD)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	2,0%	292	Com ciclos
CP 3	6,4%	320	
CP 5	2,1%	439	
CP 7	2,9%	373	
CP 2	1,6%	606	Sem ciclos
CP 4	-0,1%	655	
CP 6	1,6%	602	

Fonte: autora (2018)

Na Figura 23, tem-se um gráfico representativo dos resultados da ruptura para cal calcítica. Conforme a metodologia, para fins de resultados foram considerados os valores que diferissem em no máximo 10% do valor da média. Ou seja, nem todos os valores individuais foram representativos.

Figura 23 – Resistência à compressão simples – Solo 1 com adição de cal calcítica

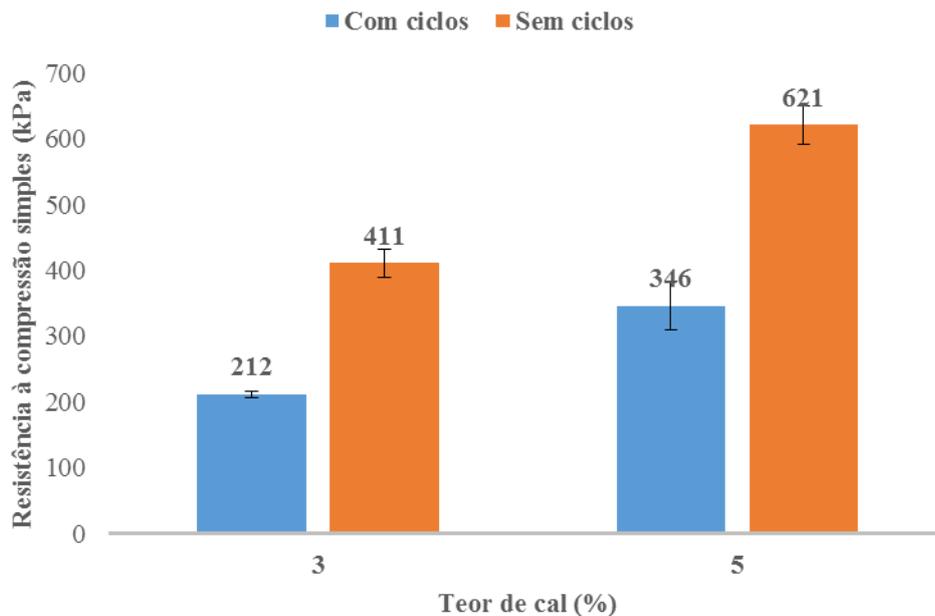


Fonte: autora (2018)

A adição de cal calcítica no solo 1, de acordo com o Método Iowa de Durabilidade não foi satisfatória visto que para 3% de cal os corpos de prova submetidos aos ciclos atingiram apenas 64,5% da resistência dos que não passaram pelos ciclos. Quanto aos CPs com adição de 5% de cal, a razão ficou em 73,8% da resistência. Para que fosse considerado apto pelo método era necessário o mínimo de 80%.

Tem-se na Figura 24, um gráfico representativo dos resultados das rupturas para mistura solo-cal com cal dolomítica para os dois teores. Os valores médios quando comparados com a cal calcítica são bem inferiores. De modo que se comprova, conforme abordado nas referências, que para um solo não tão plástico, a cal calcítica tem uma eficácia sobre as propriedades do solo maior do que a dolomítica.

Figura 24 – Resistência à compressão simples – Solo 1 com adição de cal dolomítica

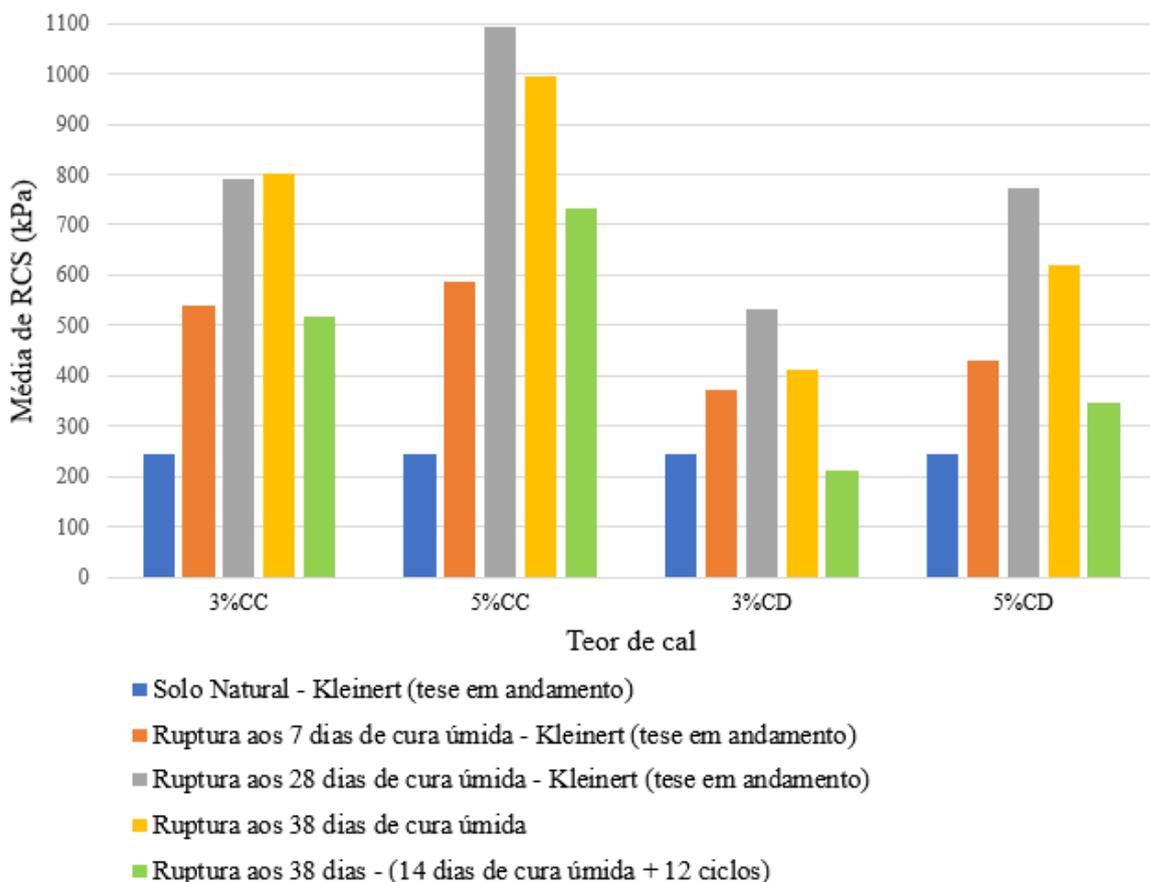


Fonte: autora (2018)

A adição de cal dolmítica no solo 1, como já esperado, foi ainda menos satisfatória. Para 3% de cal os corpos de prova submetidos aos ciclos atingiram apenas 51,6% da resistência dos que não passaram pelos ciclos. Quanto aos CPs com adição de 5% de cal, a razão ficou em 55,7% da resistência. Ou seja, o aumento do teor de cal ocasionou o aumento da RCS, porém na durabilidade o crescimento do valor foi pouco significativo.

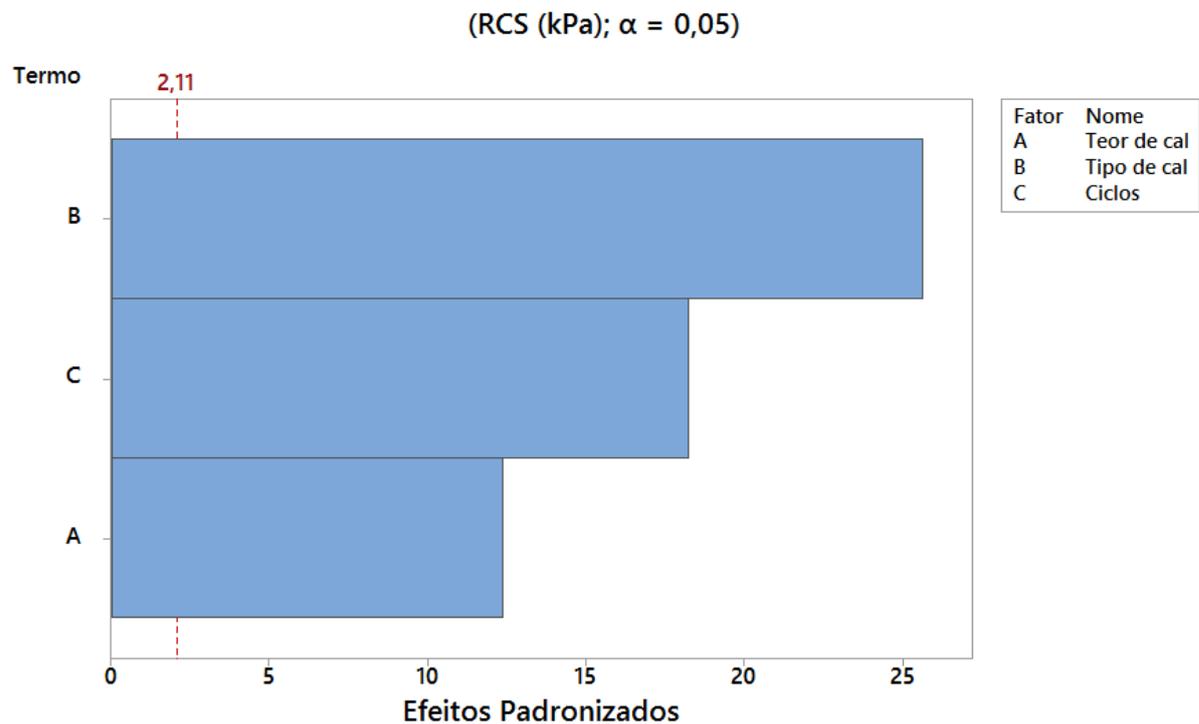
Na Figura 25, mesmo após os 12 ciclos de molhagem e secagem, o valor de resistência dos corpos de prova é superior ao valor de resistência do solo natural, exceto para 3% de adição de cal dolomítica. Observa-se também que o ganho de resistência com a utilização de cal calcítica é bem mais rápido do que para cal dolomítica, onde conforme visto na revisão, o óxido de magnésio reage mais lentamente com o solo do que o óxido de cálcio. A diferença entre os valores de resistência de 28 e 38 dias pode ter ocorrido devido as condições de em que misturados os materiais e realizada a moldagem, portanto, alterando a umidade ótima e o grau de compactação.

Figura 25 – Resistência à compressão simples – Solo 1



Da análise no Minitab, para o solo 1, os três fatores controláveis foram significativos (Figura 26), resultando em um modelo com coeficiente de determinação (R^2) de 0,98. Nenhuma das interações entre as variáveis foi considerada significativa, de acordo com o método. Foram descartados três valores de resistência, visto que seus resíduos ficaram acima do delimitado como aceitável para 95% de confiança.

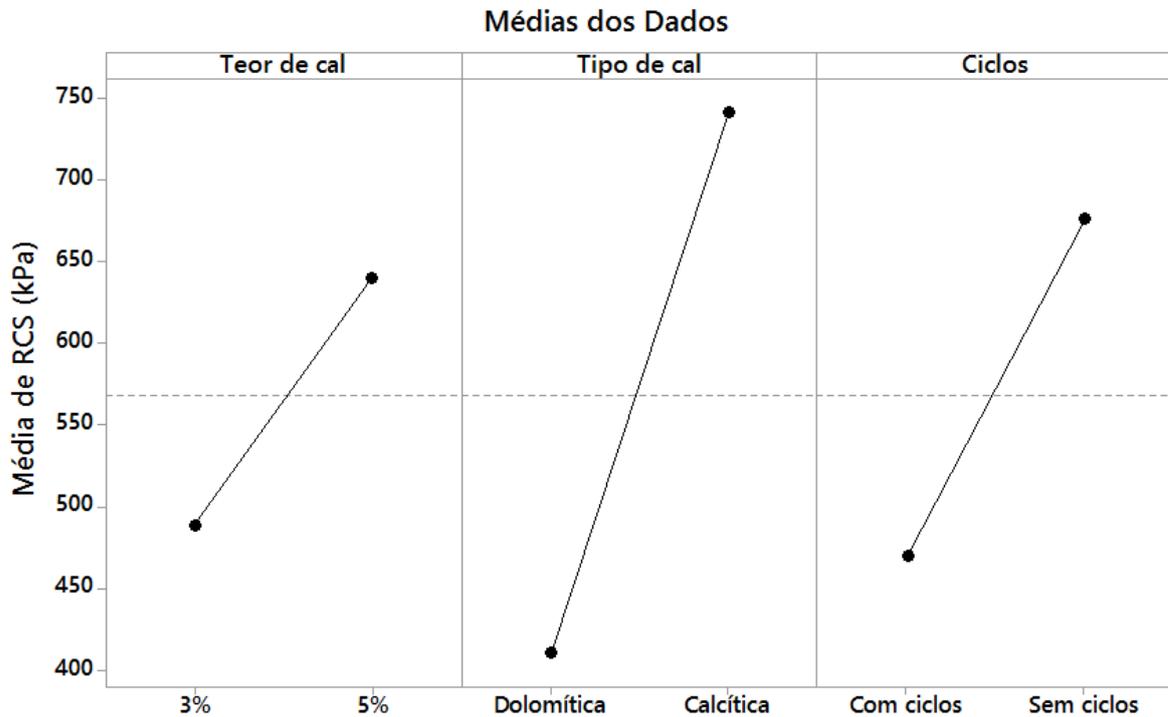
Figura 26 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados do solo 1



Fonte: autora (2018)

Na Figura 27 pode-se observar a relação direta das três variáveis controladas com as respectivas resistências à compressão simples. No solo 1, a variável que teve maior influência sobre a resistência dos corpos de prova foi o tipo de cal. Seguido pelos ciclos, e por último o teor de cal.

Figura 27 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas (S1)



Fonte: autora (2018)

4.2 SOLO DE SÃO PAULO (S2)

Assim como para o solo do estado do Rio de Janeiro, os resultados obtidos durante os ensaios de durabilidade, segundo método Iowa, são apresentados em forma de tabelas e figuras. A análise desses dados foi feita de forma conjunta num primeiro momento, levando a análise das propriedades que se sobressairam de uma forma mais específica.

A mistura solo-cal formada pelo solo 2 e a cal calcítica, apresentou diferença entre o teor de umidade medido e o teor ótimo em torno de 1%. Esses valores podem ser observados na Tabela 21. Da mesma forma para mistura solo-cal com adição de cal dolomítica. O resultado é apresentado na Tabela 22.

Tabela 21 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S2 – CC)

MISTURA	UMIDADE OBTIDA	UMIDADE ÓTIMA	DIFERENÇA
3% CC	28,58%	29,20%	-0,62%
5% CC	27,21%	28,40%	-1,19%

Fonte: autora (2018)

Tabela 22 – Diferença entre a umidade medida e a umidade ótima (S2 – CD)

MISTURA	UMIDADE OBTIDA	UMIDADE ÓTIMA	DIFERENÇA
3% CD	28,56%	29,50%	-0,94%
5% CD	26,97%	28,30%	-1,33%

Fonte: autora (2018)

Nas Tabelas 23 e 24, pode-se observar que devido a compactação dinâmica depender de uma pessoa para moldagem, as variações nos valores de altura e diâmetro dos corpos de prova são presentes. O grau de compactação de todas as misturas ficou acima de 95%.

Tabela 23 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CC

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	365,81	5,03	10,10	100
2	365,57	5,04	10,06	100
3	365,01	5,04	10,05	100
4	365,63	5,03	10,06	101
5	365,69	5,03	10,07	100
6	365,93	5,04	10,05	100
7	366,34	5,03	10,04	101

Fonte: autora (2018)

Tabela 24 – Medidas e Grau de Compactação - 5%CC

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	362,23	5,02	10,04	101
2	362,87	5,02	10,04	102
3	362,10	5,04	10,04	101
4	362,62	5,02	10,04	101
5	362,92	5,03	10,02	102
6	362,78	5,02	9,99	102
7	362,99	5,02	10,02	102

Fonte: autora (2018)

Os valores do grau de compactação do solo 2 com adição de cal dolomítica foram bem parecidos aos com adição de cal calcítica. Os valores ficaram acima de 95% para todos os corpos de prova, nos dois teores. Os valores estão apresentados nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 – Medidas e Grau de Compactação - 3%CD

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	367,76	5,02	10,06	101
2	368,48	5,02	10,05	101
3	368,56	5,02	10,05	101
4	368,23	5,02	10,01	102
5	368,52	5,05	9,97	101
6	368,37	5,03	10,02	101
7	367,58	5,02	10,05	101

Fonte: autora (2018)

Tabela 26 – Medidas e Grau de Compactação - 5% CD

CP	PESO (g)	DIÂMETRO (cm)	ALTURA (cm)	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)
1	360,33	5,01	10,01	101
2	363,66	5,03	10,07	101
3	364,23	5,02	10,05	102
4	363,90	5,03	10,01	102
5	363,38	5,01	10,07	102
6	363,75	5,02	10,07	101
7	363,70	5,02	10,02	102

Fonte: autora (2018)

Após o período de 14 dias de cura úmida, metade dos corpos de prova foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem. O 6º ciclo de molhagem e secagem foi o último em que se teve o conjunto completo da mistura do solo 2 com adição das cales, em dois teores (Figura 28). Quando comparada a Figura 29, já no 12º ciclo, pode-se ter noção da evolução da degradação dos corpos de prova no decorrer dos ciclos.

Figura 28 – Estado físico dos corpos de prova no 6º ciclo



Fonte: autora (2018)

Figura 29 – Estado físico dos corpos de prova no 12º ciclo



Fonte: autora (2018)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para o solo 2 obtiveram valores de ruptura mais baixos para os CPs que passaram pelos ciclos quando comparados ao que não passaram, como esperado. Assim como, os valores de RCS para os corpos de prova com teor de 5% foram superiores ao que receberam apenas 3% de cal. Comprovando, portanto, que o solo é reativo quando se trata da adição de cal. As Tabelas 27 e 28 mostram os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para o solo 2 com adição da cal calcítica.

Tabela 27 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 3%CC)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	-0,9%	294	Com ciclos
CP 3	-0,3%	308	
CP 5	-0,3%	312	
CP 7	-0,9%	295	
CP 2	-0,2%	493	Sem ciclos
CP 4 ¹	-0,2%	405	
CP 6	-0,1%	485	

Fonte: autora (2018)

¹ Durante a preparação para o ensaio de resistência à compressão simples, o corpo de prova sofreu uma queda brusca, o que pode explicar a diferença de resistência para os demais CPs do conjunto.

Tabela 28 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 5% CC)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	-0,5%	333	Com ciclos
CP 3	0,3%	382	
CP 5	0,3%	382	
CP 7	-0,4%	344	
CP 2	0,0%	628	Sem ciclos
CP 4	-0,1%	590	
CP 6	-0,1%	608	

Fonte: autora (2018)

Para as misturas do solo 2 e cal dolomítica, pode-se observar a grande perda de massa desde o primeiro ciclo (Figura 30). Era possível ver a grande absorção de água nos minutos iniciais da imersão dos corpos de prova, principalmente os que continham a adição da cal dolomítica. Nestes corpos de prova, a troca do ar aprisionado por água era mais aparente, possivelmente havia um maior número de vazios.

Figura 30 – CP 3 com adição de 3% CD, após o 1º ciclo de molhagem e secagem



Fonte: autora (2018)

Na Figura 31, percebe-se o nível de degradação do corpo de prova que recebeu a adição de cal dolomítica quando comparado a um CP de mesmo teor, mas com adição de cal calcítica. Vale ressaltar que as propriedades do solo influenciam tanto quanto as da cal neste resultado.

Figura 31 – Diferença entre os CPs com adição de 3% de cal, calcítica e dolomítica, respectivamente



Fonte: autora (2018)

No 9º ciclo já não havia mais nenhuma amostra da mistura deste solo com 3% de cal dolomítica (Figura 32). A ruptura em todos os todos os CPs ocorreu da mesma forma, houve a desagregação da primeira camada do restante do corpo de prova, ressaltando-se que a moldagem foi realizada em três camadas.

Figura 32 – Corpos de prova solo 2 + 3%CD (9º ciclo de molhagem e secagem)



Fonte: autora (2018)

No último ciclo de molhagem e secagem, e portanto, no dia da ruptura, dois corpos de prova da mistura que continha 5%CD também sofreram desagregação entre as camadas. Diferentemente das misturas com 3%, as rupturas não ocorreram somente na primeira camada. Um dos CPs teve sua ruptura entre a segunda e a terceira camada (Figura 33).

Figura 33 – Corpos de prova solo 2 + 5%CD (12º ciclo de molhagem e secagem)



Fonte: autora (2018)

Nas Tabelas 29 e 30, são apresentados os resultados do ensaio de RCS. Enfatizando-se que dos oito corpos de prova que passaram pelos ciclos, seis deles romperam até antes do ensaio de resistência à compressão simples.

Tabela 29 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 3%CD)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	0,0%	0	Com ciclos
CP 3	0,0%	0	
CP 5	0,0%	0	
CP 7	0,0%	0	
CP 2	0,0%	296	Sem ciclos
CP 4	-0,1%	352	
CP 6	-0,1%	359	

Fonte: autora (2018)

Tabela 30 – Resultado ensaio de resistência a compressão simples (S2 – 5% CD)

IDENTIFICAÇÃO	GANHO DE MASSA	RESISTÊNCIA	CURA
	%	kPa	
CP 1	0,0%	0	Com ciclos
CP 3	0,0%	333	
CP 5	0,0%	0	
CP 7	-2,4%	280	
CP 2	-0,1%	626	Sem ciclos
CP 4	0,0%	665	
CP 6	0,0%	639	

Fonte: autora (2018)

Os corpos de prova que não passaram pelos ciclos, de ambas as cales, estavam aparentemente intactos (Figura 34). Tiveram variação no peso extremamente pequena. E principalmente, os valores de resistência foram bem similares para as duas cales.

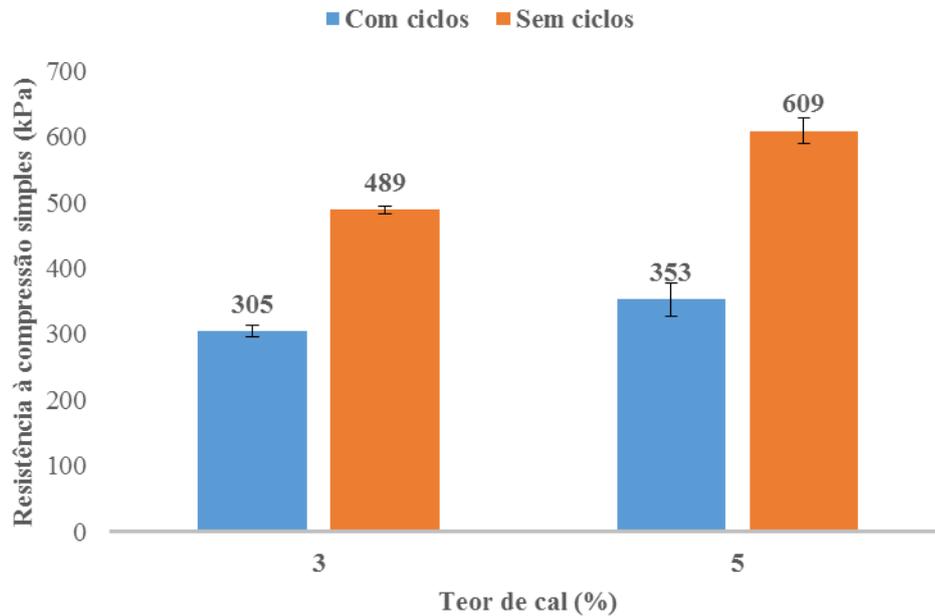
Figura 34 – Corpos de prova após 38 dias de cura úmida



Fonte: autora (2018)

Na Figura 35, tem-se um gráfico representativo dos resultados da ruptura. Para fins de resultados foram considerados os valores que diferissem em no máximo 10% do valor da média.

Figura 35 – Resistência à compressão simples – Solo 2 com adição de cal calcítica

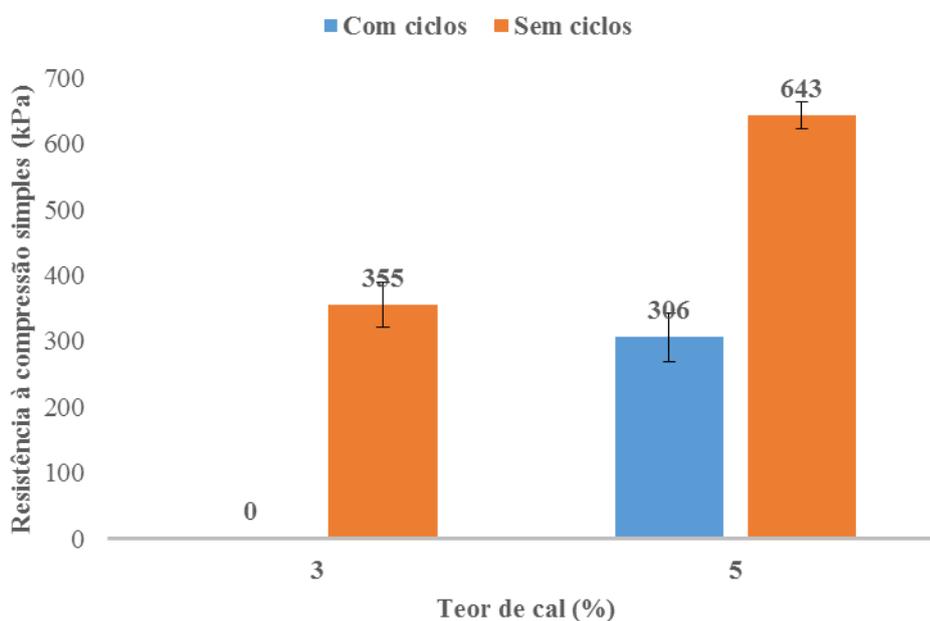


Fonte: autora (2018)

De acordo com o Método Iowa de Durabilidade, a adição de cal calcítica no solo 2, não foi satisfatória visto que para 3% de cal os corpos de prova submetidos aos ciclos atingiram apenas 62,4% da resistência dos que não passaram. E para os CPs com adição de 5% de cal, a razão ficou em 58% da resistência. O mínimo necessário aceitável pelo método era de 80%.

Tem-se um gráfico representativo dos resultados da ruptura para mistura solo-cal com cal dolomítica para os dois teores, equivalente ao da cal calcítica, mostrado na Figura 36. Os valores médios quando comparados com a cal calcítica são bem similares, e até superiores no caso de 5% de cal sem o efeito dos ciclos. Conforme as referências já citadas, solos mais plásticos e expansivos reagem muito bem sob o efeito da cal dolomítica.

Figura 36 – Resistência à compressão simples – Solo 2 com adição de cal dolomítica

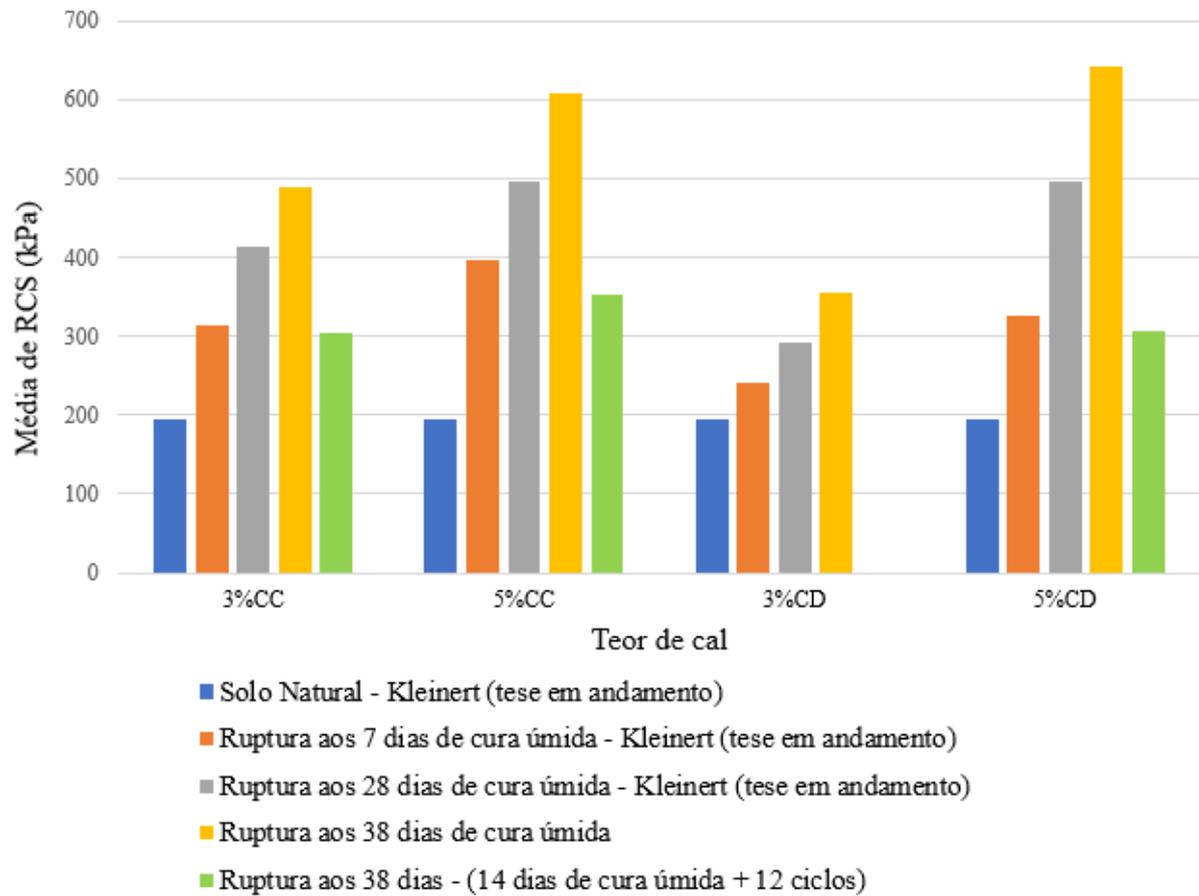


Fonte: autora (2018)

A adição de 5% de cal dolomítica no solo 2 teve os melhores resultados para este solo. Contudo, no que se trata de durabilidade, o solo não é apto para tratamento com cal segundo o Método Iowa. Para 3% de cal o conjunto de corpos de prova não saíram íntegros dos ciclos, não havendo possibilidade de realização do ensaio de RCS. Quanto aos CPs com adição de 5% de cal, a razão ficou em 47,6% da resistência. O aumento do teor de cal ocasionou o aumento da RCS, porém os ciclos de molhagem e secagem têm grande influência sobre solo, principalmente nessas duas misturas.

Na Figura 37, a mistura solo-cal com adição de 3% de cal dolomítica mostra-se fora do padrão de comportamento das demais misturas. Os corpos de prova não resistiram aos ciclos. Para as demais misturas há um crescente aumento de resistência em função do tempo de cura úmida. As misturas que passaram pelos ciclos têm resistência apenas superior a resistência do solo natural. Percebe-se com isso que a adição de cal, no geral, é favorável ao ganho de resistência dos solos, e que mesmo passando por condições severas de intemperismo ainda assim se mostra eficiente.

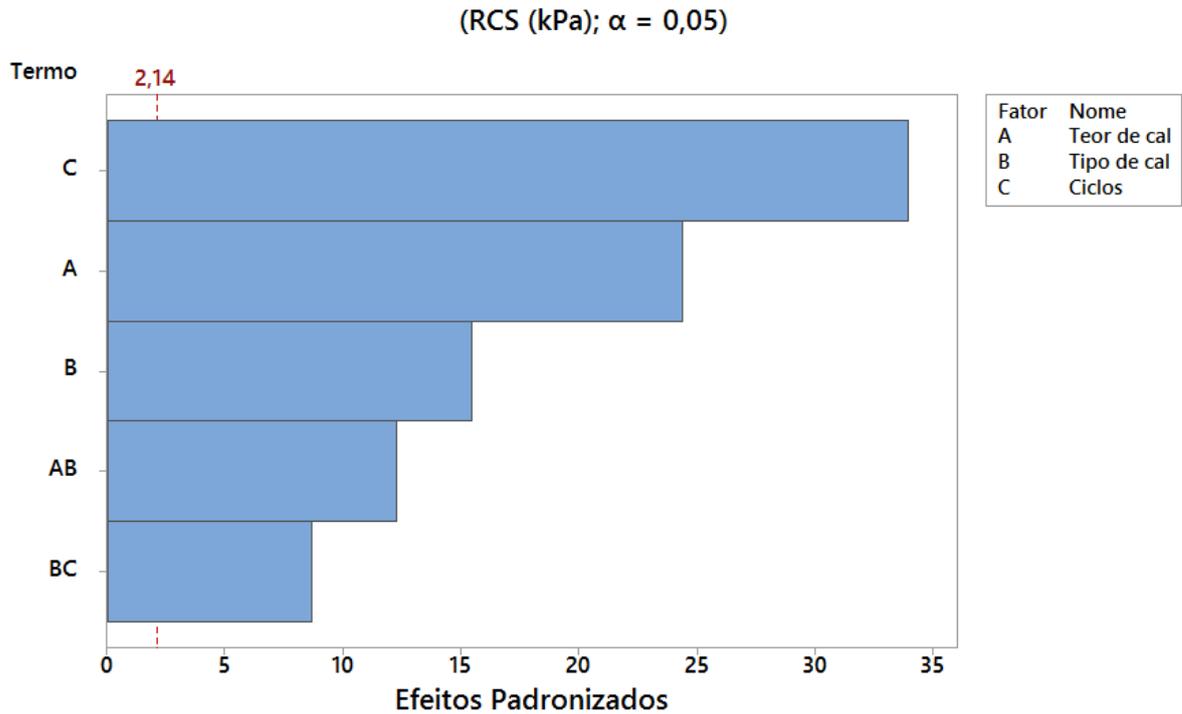
Figura 37 – Resistência à compressão simples – Solo 2



Fonte: autora (2018)

Os fatores controláveis (teor de cal, tipo de cal e processo de cura), também foram analisados para o solo 2, a partir do *software* estatístico Minitab. Dessa forma, para esse solo os três fatores controláveis foram significativos, e não somente eles, a interação do tipo de cal com teor e com os ciclos também teve grande importância nos resultados obtidos (Figura 38). O modelo resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 99,48%. Foram eliminadas da análise 5 valores de RCS, que apresentaram resíduo padronizado superior a 1,96.

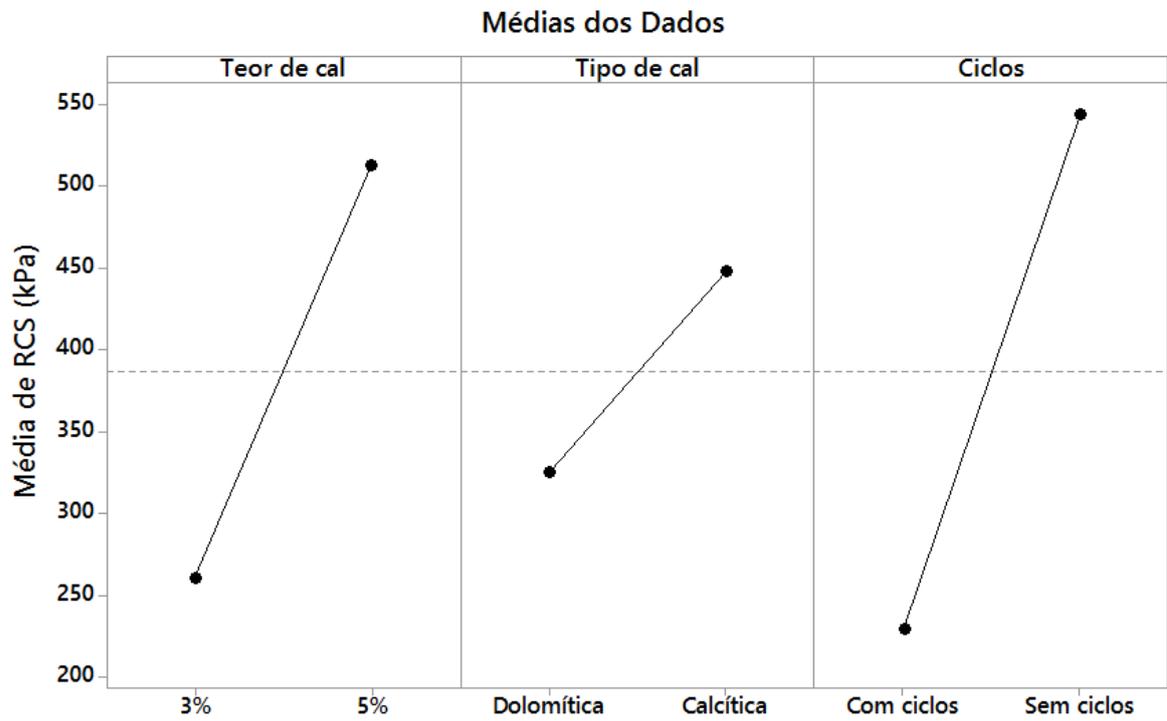
Figura 38 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados do solo 2



Fonte: autora (2018)

A relação direta dos fatores controláveis com as respectivas resistências à compressão simples é evidenciada na Figura 39. No solo 2, a variável que teve maior influência sobre a resistência dos corpos de prova foram os ciclos de molhagem e secagem. Seguido pelo teor de cal, e por último pelo tipo de cal.

Figura 39 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas (S2)



Fonte: autora (2018)

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOLOS ESTUDADOS

A análise comparativa entre os solos tem como fim ampliar os conhecimentos e verificar que, como abordado na revisão bibliográfica, não existe um teor perfeito ou uma cal ideal para uso na modificação das propriedades do solo. O solo é parte importante na mistura e sua composição influencia nos resultados de resistência, e consequentemente na durabilidade. Os ciclos de molhagem e secagem representam condições extremas de intemperismo, sendo que *in loco* existiria uma capa de revestimento asfáltico sobre esta mistura solo-cal a protegendo.

Os valores obtidos neste estudo de quociente de resistência foram inferiores aos apresentados por Lovato (2004), contudo ressalta-se que o autor optou por realizar apenas metade dos ciclos. Com relação aos resultados relatados por Marcon (1977) deve se lembrar que houve adição de cimento Portland e agregado graúdo em duas das misturas e essas atingiram valor de Q_r acima de 80%. Contudo, a mistura número 1, composta por solo, cinza volante e 4% de cal não atingiu o quociente de resistência de 80% proposto no método Iowa.

Nenhuma das misturas apresentadas na Tabela 31 chegou a um quociente de resistência igual ou superior a 80%, contudo percebe-se que as misturas têm resistência superiores as citadas por Núñez (1991), exceto as misturas de ambos os solos que receberam 3% de cal dolomítica. Essa adição de 3%CD se mostrou insuficiente para todos os casos trabalhados.

Tabela 31 – Resumo dos valores obtidos para durabilidade das misturas estudadas

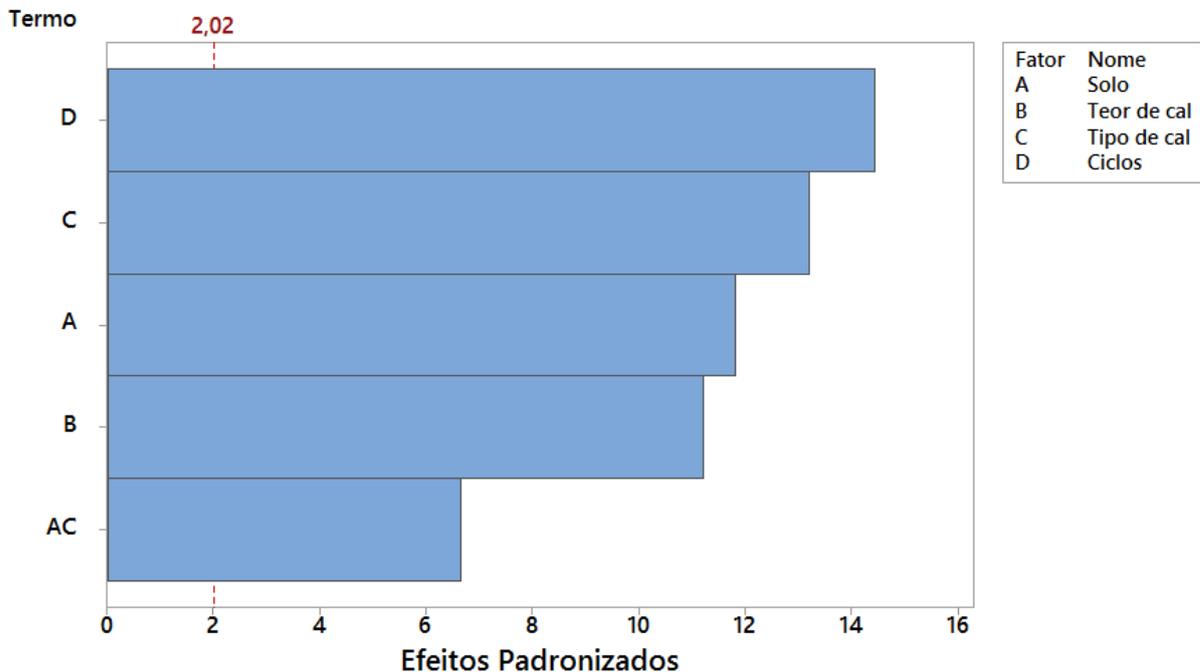
Solo	Teor de cal	RCS _{média} (kPa)		Quociente de Resistência
		Com ciclos	Sem ciclos	
RJ - S1	3% CC	517	801	64,5%
	5% CC	734	995	73,8%
	3% CD	212	411	51,6%
	5% CD	346	621	55,7%
SP - S2	3% CC	305	489	62,4%
	5% CC	353	609	58,0%
	3% CD	0	355	0,0%
	5% CD	306	643	47,6%

Fonte: autora (2018)

No Minitab, para cada uma das oito misturas, seis valores de resistência foram adotados, resultando no total de 48 valores. O modelo apresentado com os resultados de resistência à compressão simples tem R^2 de 94,14%. E apenas 2 valores foram eliminados devido ao seu resíduo padronizado.

Na Figura 40, percebe-se que os ciclos de molhagem e secagem foram a variável controlada de maior influência nas misturas, na sequência, tem-se o tipo de cal, o tipo de solo e por último o teor de cal.

Figura 40 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados das misturas estudadas
(RCS (kPa); $\alpha = 0,05$)



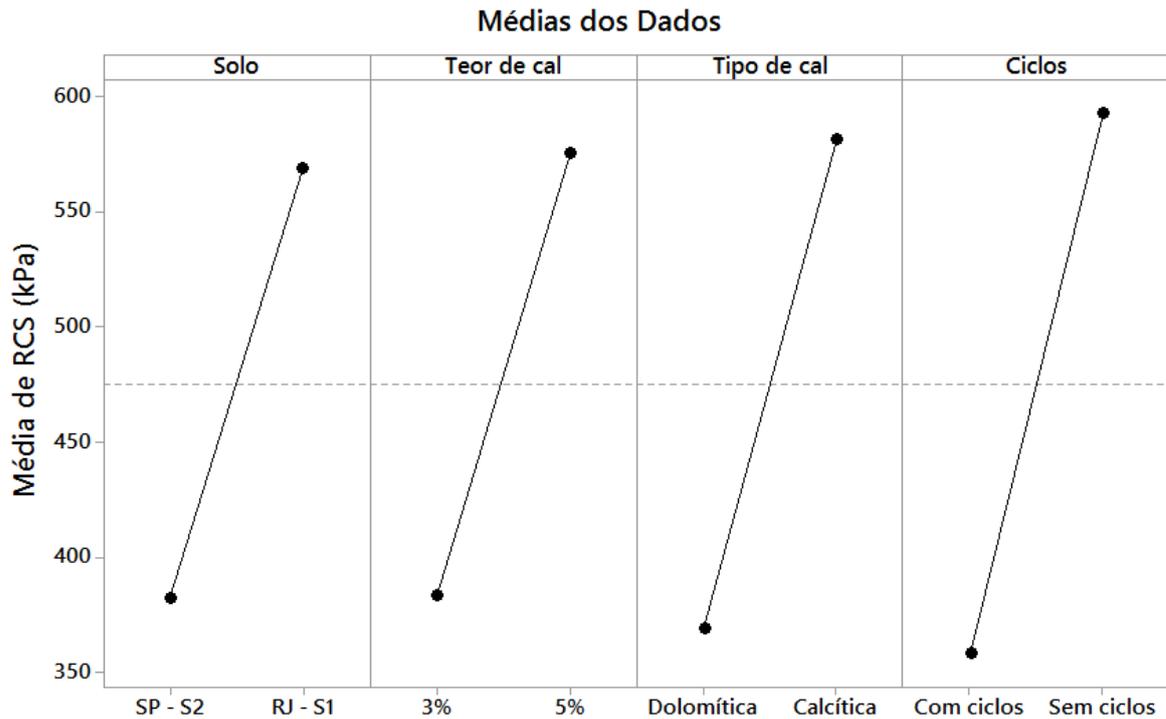
Fonte: autora (2018)

A interação entre o tipo de cal (calcítica e dolomítica) e o tipo de solo (solo do Rio de Janeiro e solo de São Paulo) é a quinta barra do gráfico apresentado, confirmando, portanto, que a interação entre os produtos da mistura deve ser bem estudados e caracterizados antes de qualquer dosagem.

A Figura 41 apresenta as relações diretas entre as variáveis controladas e as médias de resistência à compressão simples. As maiores e menores resistências foram obtidas em função dos ciclos. É possível verificar duas situações que comprovam as retas dos gráficos. Primeiro, a mistura solo-cal composta pelo solo 1, com adição de 5% de cal calcítica que ficou apenas

em cura úmida obteve os maiores valores de resistência, com média de 995 kPa. Segundo, a mistura solo-cal composta pelo solo 2, com adição de 3% de cal dolomítica que foi submetida aos ciclos de molhagem e secagem nem chegou a ser rompida, pois não aguentou a agressividade dos ciclos.

Figura 41 – Resultados de resistência em função das variáveis controladas para as misturas estudadas



Fonte: autora (2018)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adaptação do método de ensaio de durabilidade proposto por Hoover, Handy e Davidson (1958), também conhecido como Método Iowa gerou resultados coerentes e representativos para o solo 1, na medida que quando aplicado ao solo 2, mostrou-se muito severo. Observou-se que o solo 1 não sofreu desgaste ou desagregação excessiva quando submetido aos ciclos, nos dois teores, visualmente apenas as bordas foram afetadas. Em caráter de comparação, 75% dos corpos de prova do solo 2 submetidos aos ciclos, que possuíam adição de cal dolomítica, não chegaram ao final do ensaio de durabilidade.

O aumento do teor da cal hidratada nos solos de 3% para 5% elevou a resistência à compressão simples tanto para as amostras que sofreram os ciclos quanto para as amostras que permaneceram em câmara úmida durante todo o período, indicando a reatividade da cal com o solo. No geral, a cal calcítica apresentou melhores resultados em ambos os solos. A cal dolomítica teve melhor desempenho no solo 2, com adição de 5%. O valor de 3% de cal dolomítica não é satisfatório em nenhum dos solos, inclusive torna a mistura menos resistente que o solo natural.

O tipo de solo, o tipo e teor de cal influenciaram significativamente os resultados do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Todas misturas solo-cal exibiram conformidade com vários relatos presentes na literatura.

No quesito durabilidade, das análises dos resultados, conclui-se que nenhuma das misturas solo-cal estudadas apresentaram potencial de uso na construção rodoviária. Os parâmetros obtidos relativos aos ensaios de durabilidade não foram satisfatórios, segundo o método de ensaio de durabilidade adotado. Vale ressaltar que embora os resultados obtidos não tenham atingido 80%, não existe nenhuma normativa brasileira com parâmetros a serem seguidos em relação a misturas solo-cal para climas tropicais.

Sugere-se que para um próximo trabalho sejam realizados ensaios de durabilidade similares com a alteração da energia de compactação, de normal para modificada, esperando-se com o isso o aumento da massa específica aparente seca, bem como da resistência, e consequentemente a durabilidade da mistura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 6276 – 99a: **Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization**, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5102 – 09: **Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime**, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 593 – 06: **Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime**, 2011.

ARAÚJO, Arielton Fonteles. **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: **Cal Hidratada para Argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

AZEVÊDO, André Luis Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal – um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.

BALBO, José Tadeu. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARBOSA, Valquiria. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UM SOLO ARGILOSO DE CABROBÓ, POTENCIALMENTE EXPANSIVO, ESTABILIZADO COM CAL**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BARROS NETO, Benício de. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria** / Benício de Barros Neto, Ieda Spacino Scarminio, Roy Edward Brun. – 2ª ed. – Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003.

BEHAK, L. Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos com solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013.

BERNUCCI *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

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

CELAURO, B. *et al.* **Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments** . Part 1 - Review of Design Methods. In: Sustainability of Road Infrastructures - Procedia - Social and Behavioral Sciences, Anais... Elsevier B.V., 2012.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS GRANÍTICOS ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE CAL**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Estruturas, geotecnia e fundações, Universidade do Minho.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization. **Highway Research Record**, v. 92, p. 83–102, 1965.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. **Highway Research Record**, v. 139, p. 61–72, 1966.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

HERRIN, M; MITCHELL, H. **Lime-Soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D. C. 304: 99-121, 1961.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime Fixation in Clayey soils. **Highway Research Bulletin**, n. 262, p. 20–32, 1960.

HOOVER, J. M; HANDY, R. L. & DAVIDSON, D. T. **Durability of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures Compacted above Standard Proctor Density**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D. C. 193: 1-11, 1958.

JAWAD, I. T. et al. Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 8, n. 4, p. 510–520, 2014.

KLEINERT, Thaís Radünz. **Obtenção de parâmetros para dimensionamento mecânico de pavimentos com camadas de solo-cal**. Tese em andamento com previsão de defesa para 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FARIA, Valéria Cristina de; BERTOLLO, Sandra Aparecida Margarido; LEAL, Antônio Donizete. **Avaliação da contribuição estrutural de subleitos melhorados com cal**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 42, 2013, Gramado.

LIMA, D. C.; ROHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. **A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM CAL, APLICADO À PAVIMENTAÇÃO**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARCON, Antonio Fortunato. **DURABILIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MISTURAS AREIA – CAL - CINZA VOLANTE**. 1977. Tese (Mestrado em ciência) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MATEUS, MANUEL e DAVIDSON, D. T. – **Lime and fly ash proportions in soil, lime and fly ash mixtures and some aspects of soil lime stabilization** – HRB Bulletin nº 335 (1962).

NÚÑEZ, Washington Peres. **ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO RESIDUAL DE ARENITO BOTUCATU, VISANDO SEU EMPREGO NA**

PAVIMENTAÇÃO. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PAIGE-GREEN, Phil. **The Durability of Stabilized Materials.** In: 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 2008. p. 1-6.

PINTO, SALOMÃO – **Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante.** Tese M.Sc. (COPPE – UFRJ) (1971).

PUPPALA, A. J. Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. **Transportation Geotechnics**, v. 9, p. 123–138, 2016.

SENÇO, Wlastermiler de. **MANUAL DE TÉCNICAS DE PAVIMENTAÇÃO.** 1 ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, Mariana Fernandes da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal.** 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

SOUZA, Alan Nunes de Siqueira de. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário.** Faculdade de tecnologia e ciências sociais aplicadas – Fatecs, Brasília, 2014.

THOMPSON, M. R. Lime reactivity of Illinois soils. **Soil Mechanics and Foundations Division - Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, [s. l.], v. 92, p. 67–92, 1966.

THOMPSON, Marshall R. **Factors influencing the plasticity and strength of lime-soil mixtures.** University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station, 1967.