

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Jairo Garcez dos Santos

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO
ARENOSO PARA EMPREGO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS**

Porto Alegre
agosto 2019

JAIRO GARCEZ DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO
ARENOSO PARA EMPREGO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Comissão de Graduação de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Washington Peres Núñez
Coorientadora : Thaís Radünz Kleinert**

Porto Alegre
agosto 2019

JAIRO GARCEZ DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO
ARENOSO PARA EMPREGO EM CAMADAS DE
PAVIMENTOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO 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, agosto de 2019

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. Pelo PPGEC/UFRGS
Orientador

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

BANCA EXAMINADORA

Matheus Ferreira Matuella (UFRGS)
Me. Pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

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

William Fedrigo (UFRGS)
Me. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho à minha mãe, lúcia, que sempre me apoiou

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Thaís, coorientadora deste trabalho, pela paciência, compreensão e pela disposição de sempre ajudar.

Agradeço ao Professor Washington pelo tema do trabalho e por toda ajuda.

Agradeço aos amigos do LAGEOTEC, Lucas Malabarba e Jair na parte experimental do trabalho.

Agradeço aos grandes amigos, Marlon Vidalis e Wagner Padilha por toda a amizade e apoio.

Por fim, agradeço a dona Denise, dona Milene e seu Léo, os quais sempre me apoiaram durante todo o período em que estive na faculdade e se tornaram uma segunda família..

Uma pessoa inteligente resolve problemas, uma sábio previne-os.
Albert Einstein

RESUMO

Na implementação de uma nova rodovia, ao defrontar-se com solos pouco resistentes, surgem algumas opções como a remoção e substituição do solo, alteração do traçado da rodovia ou modificação/estabilização físico-química do solo local. Em geral a opção de modificar as propriedades mecânicas e volumétricas dos solos locais por meio da adição de um agente estabilizante, se mostra mais vantajosa sob o ponto de vista ambiental e econômico que as outras mencionadas. Considerando essa questão, o presente trabalho avaliou o efeito da utilização de dois agentes estabilizantes, cal e cimento, no aumento da resistência à compressão simples de um solo arenoso, proveniente da rodovia SP 300, estaca 84, próximo do município de Tietê, no estado de São Paulo. Para tanto, utilizou-se o método de Thompson e o método da NBR 12023 (ABNT, 2012) para as misturas solo-cal e solo-cimento respectivamente. No caso da cal, houve a moldagem de solo com a adição de 3% de cal calcítica, na energia modificada, onde se buscou verificar o incremento de resistência aos 28 dias de cura úmida. Para o solo-cimento houve a moldagem de solo com a adição de 7%, 9%, 11% e 13% de cimento CP-IV, onde se verificou a resistência à compressão simples obtida aos 7 dias de cura, com 4 horas de imersão. Os resultados obtidos mostraram que o teor de cal possibilitou um incremento de 180 kPa aos 28 dias, em relação ao solo natural, não atendendo com isso o critério adotado. Já para solo-cimento, observou-se que com o aumento do teor de cimento houve ganho de resistência entre 7 e 28 dias de cerca de 1,2 MPa independente do teor de cimento. O teor de 10% de cimento, obtido por interpolação, promoveu a estabilização, isto é, proporcionou uma resistência de 2,1 MPa aos 7 dias. Constatou-se ser elevado o teor de cimento, mas acredita-se que o fato de o solo apresentar grande quantidade de finos justifica o resultado obtido.

Palavras-chave: solo-cal, solo-cimento, estabilização de solos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de troca de cátions	18
Figura 2 – Aglomeração e floculação	19
Figura 3 – Representação de uma mistura argila - cimento	24
Figura 4 – Representação de uma mistura areia-cimento.....	24
Figura 5 – Solo utilizado nos ensaios	27
Figura 6 – Solo destorroado e passado na peneira n° 4.....	28
Figura 7 – Corpos de prova imersos em água	35
Figura 8 – Rompimento de corpos de prova.....	36
Figura 9 – Curva granulométrica.....	37
Figura 10 – Análise mineralógica - Método do pó.....	39
Figura 11 – Análise mineralógica - Método orientado.....	40
Figura 12 – Resultados dos ensaios do pH.....	41
Figura 13 – Curva de compactação solo-cal.....	42
Figura 14 – Evolução da resistência do solo com cal calcítica	42
Figura 15 – Curvas de compactação para diferentes teores de cimento	43
Figura 16 – Teor ótimo de cimento	44
Figura 17 – Comparação da RCS para diferentes idades e teores de cimento	45
Figura 18 – Variação com o teor de cimento.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências físicas e químicas das cales hidratadas	17
Tabela 2 - Características da cal	29
Tabela 3 - Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação	31
Tabela 4 - Caracterização do solo.....	38
Tabela 5 - Análise mineralógica.....	40

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – American Association of State Highway and Transport Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

CP – Corpo de prova

CSH – Silicato hidratado de cálcio

ES – Especificação de serviço

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LDRX – Laboratório de Difração de Raio X

LP – Limite de Liquidez

NBR – Norma Brasileira

R^2 – Coeficiente de determinação do modelo

SiO_2 – Sílica do solo

RCS – Resistência à compressão simples

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ω – Teor de umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo principal.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 SOLO-CAL.....	16
2.1.1 A cal.....	16
2.1.2 Reações solo-cal.....	17
2.1.2.1 Troca catiônica.....	18
2.1.2.2 Floculação/aglomeração.....	18
2.1.2.3 Carbonatação	19
2.1.2.4 Reações pozolânicas.....	19
2.1.3 Solo modificado e solo estabilizado com cal	20
2.1.4 Parâmetros de compactação	20
2.1.5 Resistência	20
2.1.6 Métodos de dosagem para solos melhorados ou estabilizados com cal.....	21
2.2 SOLO-CIMENTO	22
2.2.1 Cimento.....	22
2.2.2 Solos melhorados com cimento e solos estabilizado.....	22
2.2.3 Reações solo-cimento	23
2.2.4 Parâmetros de compactação solo-cimento.....	25
2.2.5 Solos apropriados para a estabilização com cimento	25
2.2.6 Método de dosagem para solo-cimento.....	25
2.2.7 Análise mineralógica	26
3. MATERIAIS	27
3.1 SOLO	27
3.2 CIMENTO	28
3.3 CAL	28
4. MÉTODOS.....	30

4.1 MÉTODO DE DOSAGEM	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	31
4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO-CAL.....	32
4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO-CIMENTO.....	33
4.5 MOLDAGEM E CURA DAS MISTURAS SOLO-CAL	33
4.6 MOLDAGEM E CURA DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO.....	34
4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	35
5. RESULTADOS	37
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	37
5.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CAL.....	40
5.3 CURVA DE COMPACTAÇÃO SOLO-CAL.....	41
5.4 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO-CAL	42
5.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO CIMENTO	43
5.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE CIMENTO	44
5.7 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA COM TEOR DE CIMENTO.....	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é realizada uma breve descrição do problema, objeto do trabalho, e uma análise sobre a relevância do estudo. Além disso, são descritos os objetivos que se busca alcançar.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

No Brasil, grande parte da produção nacional é transportada por malha rodoviária, esta por sua vez nem sempre possui a qualidade necessária às solicitações impostas, seja devido à má conservação, ao dimensionamento inadequado ou até mesmo da falta de pavimentação.

Segundo dados do Sistema Nacional de Viação (2016), a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas. Um dos motivos para prevalência de rodovias não pavimentadas está associado, em grande parte, ao elevado custo, principalmente quando os solos não apresentam as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada.

Na implementação de uma nova rodovia, ao defrontar-se com solos pouco resistentes, surgem algumas opções como remoção e substituição do solo, alteração do traçado da rodovia ou modificação/estabilização do solo local. A estabilização do solo pode se dar tanto através de correção granulométrica ou pela ação de agentes químicos.

Em geral a remoção/substituição do material implica em elevar os custos da obra, já que muitas vezes os materiais de boa qualidade encontram-se distantes. Além disso, a medida se mostra bastante impactante ao meio ambiente. A outra medida consiste em redefinir o projeto geométrico, o que nem sempre é viável, dada às limitações de espaço comumente impostas a obra.

Neste contexto, a opção de modificar as propriedades mecânicas e volumétricas dos solos locais por meio da incorporação de um agente estabilizante, se mostra mais vantajosa sob o ponto de vista ambiental e econômico que as outras mencionadas.

A escolha do tipo e teor do agente estabilizante é influenciada por diversas questões, dentre elas o tipo de solo. Para estabilização de solos argilosos, a cal se mostra muito adequada. Já para a estabilização de solos arenosos, em geral, utiliza-se o cimento. A técnica de melhoramento utilizando cal pode ser empregada na secagem de solos muito úmidos, redução de certas características indesejáveis tais como plasticidade excessiva e expansão, podendo adicionalmente produzir um aumento da resistência. Já a técnica utilizando cimento além de promover melhora das características volumétricas, também proporciona um considerável aumento da resistência.

Considerando esta questão, o presente trabalho visa avaliar os efeitos de um teor de cal e de variados teores de cimento, necessários para promover a estabilização de um solo.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho consiste em definir qual agente mais adequado para estabilizar o solo de estudo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- a. Caracterização do solo
- b. Definição do teor ótimo do agente estabilizador.
- c. Verificar o efeito do teor de cimento e do tempo de cura na resistência à compressão simples.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi realizado em etapas, sendo dividido em seis capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre mecanismos de estabilização de solo-cal e de solo-cimento, os parâmetros empregados para avaliar a reatividade de um solo ao agente estabilizante e os aspectos gerais, comportamento e características de um solo estabilizado ou melhorado com cal ou cimento.

No capítulo três são descritos os materiais utilizados no trabalho.

No capítulo quatro são definidos os métodos, indicando quais métodos de dosagem e ensaios que são utilizados.

Os resultados são apresentados no quinto capítulo.

Por fim, no capítulo seis são apresentadas as conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São abordadas neste capítulo as referências utilizadas neste trabalho para o embasamento teórico do estudo experimental realizado. Em dois subitens são descritos os conceitos básicos sobre solo-cal e solo-cimento. Em termos de cal, são abordadas definições, reações solo-cal e solos estabilizados e modificados com este aglomerante. Com relação ao solo-cimento, acrescenta-se ainda parâmetros de compactação, métodos de dosagem e sua análise mineralógica.

2.1 SOLO-CAL

2.1.1 A cal

A cal é um aglomerante resultante da reação química de decomposição térmica de rochas carbonatadas, constituídas majoritariamente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio. Segundo Guimarães (2002), o produto da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio dá origem, respectivamente, ao óxido de cálcio (CaO) e ao cálcio-magnésio (CaO – MgO), também conhecidos como cal virgem ou cal viva. Abaixo é possível visualizar as reações químicas de calcinação.

- $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{MgO} + 2\text{CO}_2$

Ao produto da calcinação que possui elevado teor de óxido de cálcio, dá-se o nome de cal calcítica, já se o resultado dá origem a uma relação semelhante entre os óxidos de cálcio e magnésio, dá-se o nome de cal dolomítica.

Quando submetida à hidratação, a cal virgem dá origem a cal hidratada, a qual é encontrada na forma de pó seco, tendo de 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002).

A NBR 7175 (ABNT, 2003) classifica os tipos de cales hidratadas disponíveis comercialmente no mercado brasileiro em CH-I, CH-II e CH-III. A tabela 1 mostra certas exigências físicas e químicas que a norma indica.

Tabela 1 - Exigências físicas e químicas das cales hidratadas

Exigências químicas				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CAO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CAO _t +MgO _t)		≥ 88%	≥ 88%	≥ 88%
Exigências físicas				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida aculada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≤ 75%	≤ 75%	≤ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

(fonte: adaptado da NBR 7175/2003)

2.1.2 Reações solo-cal

A mistura de solo, cal e água em proporções determinadas através de ensaios laboratoriais, é definida como solo-cal. O emprego dessa técnica é fundamentado em reações físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a fração argila (AZEVEDO et al., 1998).

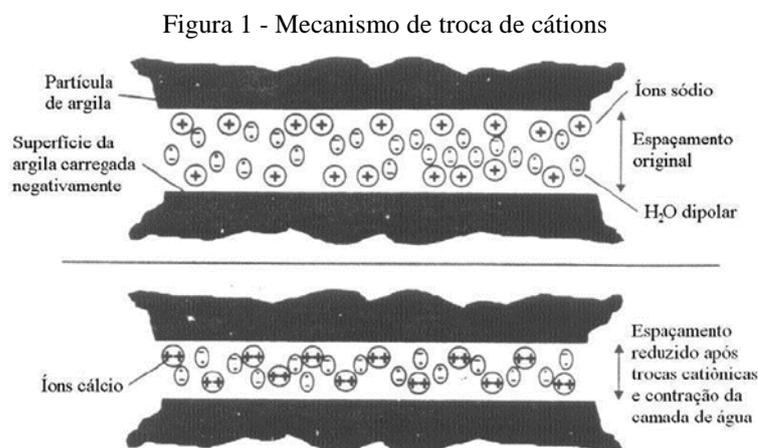
Ao se adicionar cal a um solo fino, juntamente com água, ocorrem reações químicas caracterizadas por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida que dura de horas a dias e outra lenta que pode levar meses a anos (CASTRO, 1995). Lopes Junior (2011, p. 34-35) explica que:

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo de interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, flocculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas que proporcionam um aumento da

resistência, devido a formação de produtos cimentantes e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial, uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas.

2.1.2.1 Troca catiônica

Ao adicionar a cal a um solo, os cátions derivados da cal, de maior valência, substituem os cátions de menor valência, como os de sódio, magnésio e hidrogênio, presentes na superfície das partículas de argila. Este processo resulta na estabilização da camada de água intersticial, também chamada de camada dupla difusa e uma redução considerável do tamanho desta (LITTLE, 1995). A figura 1 ilustra o mecanismo de troca catiônica.

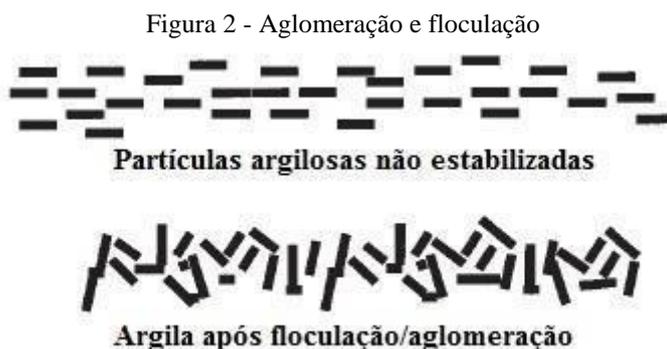


F

(fonte: PRUSINSKI & BHATCHARJA 1999)

2.1.2.2 Floculação/aglomeração

Ao ser reduzida a espessura de água intersticial no processo de troca catiônica, as partículas de solo conseguem se aproximar mais umas das outras, com isso ocorre a atração face à borda entre as partículas de solo, este fenômeno é conhecido como aglomeração. Aliado a este processo ocorre a floculação, que consiste na aglutinação das partículas finas, dando origem a partículas de maiores dimensões. A floculação é causada pela concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da água, esta devida ao processo de troca catiônica (LITTLE, 1995). A figura 2 ilustra o processo de floculação/aglomeração de partículas argilosas.



(fonte: PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999)

2.1.2.3 Carbonatação

Consiste na combinação de óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nos materiais que constituem a mistura solo-cal ou durante o processo de execução/compactação. A reação tende a refazer o carbonato original (GUIMARÃES, 2002). Este carbonato de cálcio e/ou magnésio formado é um composto cimentante fraco, ruim em termos de resistência (CARVALHO, 1988).

A carbonatação da cal resulta numa perda de reatividade, pois a cal na forma de carbonato não reage com a fração fina do solo, o que acaba por limitar o processo de estabilização. Desta forma a compactação imediatamente após a execução da mistura solo-cal é fundamental, pois com isso é reduzida a porosidade do material, o que implica na diminuição da circulação interna de ar e conseqüentemente na redução da carbonatação (LE ROUX, 1969).

2.1.2.4 Reações pozolânicas

Consiste na formação e cristalização de produtos cimentícios, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, através disso ocorre a cimentação das partículas circunvizinhas, aglomerando-as (GUIMARÃES, 2002). As reações pozolânicas são as responsáveis pelo aumento de resistência em longo prazo das misturas solo-cal (LITTLE, 1995).

2.1.3 Solo modificado e solo estabilizado com cal

De acordo com Little (1999), existem dois processos de melhoramento das propriedades de solos com o uso da cal, a modificação e a estabilização.

A modificação ocorre entre a fração fina do solo e a cal, e exibe nos solos argilosos melhorias como redução da expansão, mudança na textura, redução da plasticidade e melhora na trabalhabilidade. As quais são devidas às reações de troca catiônica e flocculação/aglomeração.

Por outro lado, o processo de estabilização está associado a ganhos significativos de resistência, que acontecem à longo prazo, em função do desenvolvimento das reações pozolânicas. Estas reações consistem na formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados na superfície do argilo mineral.

2.1.4 Parâmetros de compactação

A adição de cal aos finos do solo os torna mais flocculados devido a substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à flocculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumenta. Esta estrutura flocculada é forte o suficiente para se opor aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo desta forma o peso específico aparente do solo seco. Quanto maior a quantidade de vazios mais água será necessária para preenchê-los, o que implicará em uma umidade ótima maior e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH et al., 1998).

2.1.5 Resistência

A resistência de misturas solo-cal é função de diversas variáveis tais como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo de cura, temperatura e energia de compactação. É costumeiro avaliar a resistência através de ensaios de compressão simples, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e compressão triaxial (TRB, 1987).

Quem determina em que teor de cal o solo terá suas propriedades modificadas é a dosagem do estabilizante. O propósito do processo de estabilização: modificação ou estabilização é quem

vai decidir qual teor exigido de estabilizante (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999). Segundo Queiroz de Carvalho (1979):

[...] avaliou as alterações nas propriedades de solos lateríticos do estado da Paraíba estabilizados com cal. O autor encontrou valores de resistência à compressão simples variando de 80 a 1920 KN/m² para o solo natural (sem imersão prévia). Para os solos estabilizados com teores entre 3 e 6% de cal cálcica, a resistência pós 28 dias de cura variou entre 210 e 5390 KN/m². Além disso, na grande maioria dos casos 4, 5 a 6% foi suficiente para se atingir um máximo aumento na resistência.

Núñez (1991), observou ao estudar a influência do teor de cal na estabilização de um solo arenoso que maiores teores de cal correspondem a maiores ganhos de resistência a compressão simples e verificou ainda, que aumentando a energia de compactação de normal para intermediária implicava em acréscimo de resistência.

Núñez (1991) ao estudar os efeitos do tempo de cura de um solo arenoso com teor de cal variando de 0 a 9% de cal observou que corpos de prova com adição de 3%, após 14 dias de cura úmida, não mais se desintegravam ao serem imersos em água, enquanto que os curados apenas sete dias não resistiram à imersão, mesmo possuindo um teor de cal de 9%. Segundo o autor isto parece indicar um tempo mínimo para início das reações pozolânicas situado entre 7 e 14 dias.

Prusinski e Bhattacharja (1999), estudando os efeitos da adição de 3% de cal em um solo e 5% de cal em outro, verificaram acréscimos na resistência à compressão simples, RCS, ao longo do período de cura (7, 28 e 90 dias).

2.1.6 Métodos de dosagem para solos melhorados ou estabilizados com cal

Para estabelecer os teores exigidos para o processo de modificação ou estabilização, encontram-se na literatura diversos métodos, dentre os mais utilizados estão o método de Thompson e o ensaio de pH.

O método de Thompson define como reativo um solo que ao reagir com a cal sofra um aumento de resistência à compressão simples de 345 kPa, após 28 dias de cura, à temperatura de 22,8 °C. Desta forma, testa-se teores de cal de modo a encontrar o teor mínimo que fornece esse incremento de resistência definido por Thompson (1975).

O ensaio de pH (ASTM, 2006) consiste em medir o pH de amostras de solo com diferentes teores de cal, de modo que menor porcentagem de cal no solo que resulta em um pH de 12,4 é considerada como o teor necessário a estabilização.

2.2 SOLO-CIMENTO

2.2.1 Cimento

O cimento portland consiste em um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer, adicionado a sulfatos de cálcio e adições. O processo de fabricação inicia-se com a britagem, moagem e mistura de rochas calcárias, em proporções adequadas com argila moída. A mistura formada é submetida em um forno rotativo de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna alcança 1.450 °C. Por fim, nesta etapa ocorre a reação química de calcinação do calcário, ou seja, a rocha calcária (CaCO_3) é transformada em cal virgem (CaO).

O calor intenso transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado. Na sequência, em moinhos industriais, o clínquer é finamente pulverizado, com pequena porção de gesso (gipsita). O mesmo tem por finalidade controlar o tempo de pega e com eventuais adições de escórias, pozolanas e fíler. Estas adições dão origem aos diversos tipos de cimento.

2.2.2 Solos melhorados com cimento e solos estabilizado

Se define um solo melhorado com cimento quando a adição de cimento resulta em melhorias na plasticidade do solo, sem objetivar alterações da resistência. Essa situação, em geral, acaba requerendo pouca quantidade de cimento. Por outro lado, se diz um solo estabilizado quando se busca é aumentar a resistência do mesmo. (CANCIAN, 2013).

2.2.3 Reações solo-cimento

A NBR 12253 (ABNT, 2012) define solo-cimento como o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Ao ser adicionada água, o cimento hidrata, produzindo componentes de cimentação que são independentes do solo. Esses produtos são silicatos e aluminatos hidratado de cálcio e cal hidratada. Os primeiros dois são responsáveis pela maior parcela da cimentação, sendo o aumento da resistência devido a ligação que ocorre entre as partículas de sólido e os produtos hidratados. Nesse processo acaba ocorrendo a liberação de cal, caso o solo possua argila, acaba por ocorrer uma segunda reação de cimentação, idêntica à que ocorre na estabilização de solo-cal (CUNHA, 1992).

Moh (1965 apud NÚÑEZ, 1991) apresentou o seguinte esquema para as reações primárias e secundárias do solo-cimento

Reações primárias:

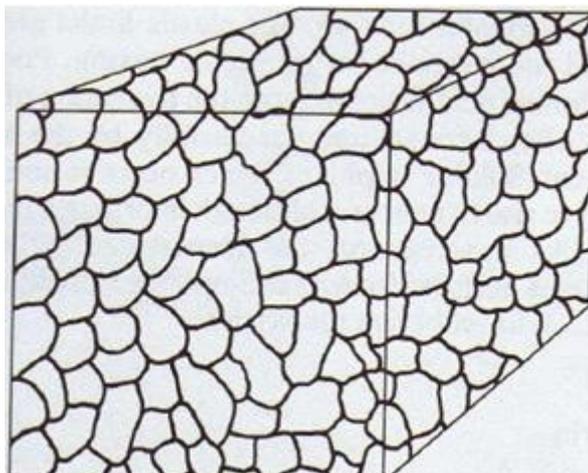


Reações secundárias:



O comportamento da estabilização com cimento nos solos se dá de maneira diferente em solos argilosos e solos arenosos. No caso dos solos argilosos se tem a formação de estrutura, como uma espécie de esqueleto, composto por produtos de hidratação, os quais envolvem as partículas de argila (LILLEY, 1975). A figura3, ilustra a estrutura formada em solos argilosos.

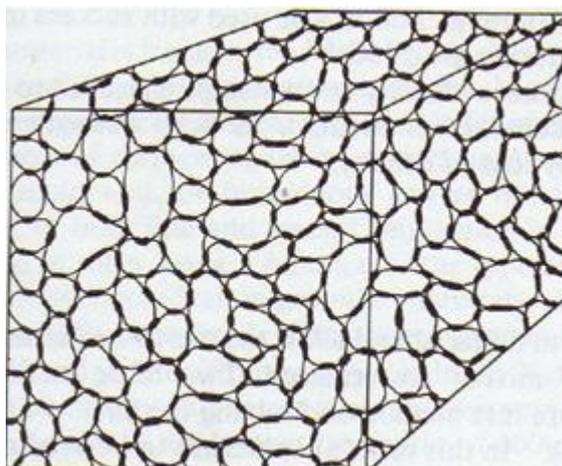
Figura 3 - Representação de uma mistura argila - cimento



(fonte: adaptado de LILLEY 1975)

Enquanto que em solos arenosos ocorrem ligações interpartículas, isto é, os produtos de hidratação acabam por fazer a ligação entre os grãos do solo. Na figura 4 pode-se observar isso.

Figura 4 - Representação de uma mistura areia-cimento



(fonte: adaptado de LILLEY 1975)

Os solos com granulação fina, com elevadas quantidades de silte e argila acabam requerendo grandes quantidades de cimento, em relação aos solos granulares (CUNHA, 1992).

2.2.4 Parâmetros de compactação solo-cimento

Kézdi (1979 apud NÚÑEZ, 1991) estudando as alterações na curva de compactação promovidas pelas adições de cimento, percebeu que em solos arenosos a massa específica aparente seca aumento com a adição do estabilizante, enquanto que nos siltes diminui. Já com relação a umidade ótima, a mesma pouco varia em relação ao teor de cimento utilizado.

De maneira geral, quanto maior for a densificação gerada pela compactação, melhor será a resistência do solo estabilizado. LEONARD (1962).

2.2.5 Solos apropriados para a estabilização com cimento

De acordo com a NBR 11798 (ABNT, 2012) para fins de pavimentação em geral podem ser empregados normalmente, na execução do solo-cimento, os solos com as características seguintes:

- diâmetro máximo = 75mm
- passando na peneira nº 4 (4,8mm) $\geq 50\%$;
- passando na peneira nº 40 (0,42mm), de 15% a 100%;
- passando na peneira nº 200 (0,075mm) $\leq 50\%$;
- limite de liquidez $\leq 40\%$
- limite de plasticidade $\leq 18\%$

2.2.6 Método de dosagem para solo-cimento

A NBR 12253 (ABNT, 2012) recomenda a execução de ensaios de resistência à compressão simples a fim de verificar qual o teor mínimo de cimento que proporciona uma resistência de 2,1 MPa aos 7 dias. Independentemente dos resultados dos ensaios de resistência, a norma sugere que devem ser utilizados no mínimo 5% de cimento em massa. É importante ressaltar

que o método de dosagem se restringe aos solos que se enquadram nas classificações A1, A2, A3 e A4.

2.2.7 Análise mineralógica

Conhecer a mineralogia se faz necessário para o êxito das reações solo-cimento. A eventual presença de montmorilonita, pelo seu alto teor de sílica não hidratada, mesmo que em pequenas quantidades, prejudica a estabilização dos solos, pois ao entrar em contato com a água da mistura solo-cimento, ela acaba se expandindo, causando, com isso, a retração acentuada durante a cura (GONÇALVES, 1989).

3. MATERIAIS

A seguir são apresentados os materiais utilizados na pesquisa

3.1 SOLO

O solo estudado neste trabalho foi coletado na rodovia SP 300, estaca 84, no município de Tietê, no estado de São Paulo. Foi transportado até o LAPAV onde foi devidamente armazenado em sacos fechados com o intuito de evitar sua contaminação. Em seguida foi feita a sua secagem ao ar e transporte até o LAGEOTEC, onde foi destorroado, passado na peneira nº 4 (4,8 mm) e colocado em tonéis devidamente fechados, sendo aberto apenas durante sua utilização. As figuras 5 e 6 ilustram o solo utilizado.

Figura 5 - Solo utilizado nos ensaios



(Fonte: autor, 2019)

Figura 6 - Solo destorroado e passado na peneira n° 4



(fonte: autor 2019)

3.2 CIMENTO

Utilizou-se o cimento CP IV para a estabilização do solo. A escolha deste cimento foi determinada pela disponibilidade do material no comércio local de Porto Alegre – RS. O CP IV é um cimento composto, segundo a NBR 5736 (ABNT, 1986), com 45 a 85% de clínquer e sulfatos de cálcio, 15 a 50% de material pozolânico e 0 a 5% de material carbonático.

3.3 CAL

Foi utilizada na mistura solo-cal, cal calcítica, cuja composição química encontra-se na tabela 2, abaixo. Observa-se que da análise fornecida pelo fabricante, apresenta 88,8% de óxidos totais na base de não voláteis, atendendo desta forma às exigências químicas estabelecidas pela NBR 7175 (ABNT, 2003).

Tabela 2 - Características da cal

Parâmetro	Teor (%)
Mgo	0,55
Al ₂ O ₃	0,05
SiO ₂	12,00
Ca total	73,08
Fe ₂ O ₃	0,18
CO ₂	2,42
S	0,03
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
P ₂ O ₅	0,06
SrO	0,39
ZrO ₂	0,05
MnO	-
ZnO	-
TiO ₂	-
BaO	-
Cl	0,02
Perda por combustão	25,22

(fonte: adaptado de KLEINERT)¹¹ tese em andamento

4. MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os métodos para determinação do teor de cal e de cimento para promover a estabilização do solo estudado, quais ensaios foram utilizados para caracterização dos materiais (solo, cimento, cal), ensaios de compactação realizados, como se deu a moldagem e cura dos corpos de prova e, por fim, os ensaios de resistência à compressão simples.

4.1 MÉTODO DE DOSAGEM

Para a mistura solo-cal iniciou-se o trabalho pelo ensaio de pH, visando ter um primeiro valor de referência para testar a cal. O teor encontrado não necessariamente irá estabilizar o solo, mas irá fornecer uma estimativa aproximada de qual teor deve iniciar os testes. Como citado anteriormente, com o ensaio de pH (ASTM, 2006) se obtém como resultado o menor teor de cal que fornece o pH de 12,4, sendo este considerado o teor necessário para a estabilização do solo.

Para mistura solo-cimento foi adotado o método indicado pela NBR 12023 (ABNT, 2012). O mesmo estabelece um método de dosagem de solo-cimento para emprego em camadas de pavimentos. O método prevê que inicialmente se faça a caracterização do solo, a fim obter a classificação HRB (ASTM D 3282) do mesmo. A seguir deve-se fazer o ensaio de compactação. Para isso utilizam-se os valores sugeridos na tabela 3, sendo que a mesma sugere valores de acordo com a classificação do solo, por isso a necessidade prévia de se realizar a caracterização.

Tabela 3 - Teor de cimento sugerido para o ensaio de compactação

Classificação do solo (HBR)	Teor sugerido de cimento, em massa (%)
A1 - a	4
A1 - b	
A2	5
A3	7
A4	

(fonte: adaptado de NBR 12253/2012)

De posse dos valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, obtidos do ensaio de compactação, a próxima etapa consiste na moldagem dos corpos de prova, com a mesma devendo ser realizada com no mínimo três teores de cimento. Com cada teor selecionado, deve-se moldar e curar por 7 dias, no mínimo, três corpos de prova cilíndricos conforme a NBR 12024 (ABNT, 1986).

Decorrido o período de cura, os corpos de prova devem ser imersos por 4 horas em água à temperatura ambiente e, depois de secos superficialmente, submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, visando determinar aquele que atenda ao critério de resistência mínima de 2,1 MPa.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização do solo iniciou-se pela obtenção da curva granulométrica. Foi necessário realizar o ensaio de peneiramento e sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). Os limites de liquidez e plasticidade foram determinados conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Para determinação do teor de umidade do solo seguiu-se a NBR 6457 (ABNT, 2016). Por fim, a massa real dos grãos foi obtida por meio do ensaio descrito na norma NBR 6458 (ABNT, 2016).

Complementarmente, visando identificar os tipos de argilas que compõem o solo estudado, foi realizada a análise mineralógica, quantitativa e semiquantitativa da fração argila do solo por meio de difratogramas de Raios X.

Os ensaios foram realizados por técnicos do LDRX (laboratório de difratometria de Raio X), este vinculado ao instituto de geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO-CAL

A compactação das misturas solo-cal seguiu o procedimento descrito na NBR 7182 (ABNT, 1986).

Inicialmente foram coletadas duas canecas de solo provenientes das bombonas, o mesmo já se encontrava devidamente destorroado e passado na peneira nº 4. As canecas então eram colocadas na estufa de 110°C com o intuito de se obter a umidade que se encontrava o solo.

De posse dos valores de umidade foram separadas quantidades de solo para cada amostra utilizada no ensaio de compactação. A seguir foi adicionada água nas amostras de solo a fim de homogeneizar as mesmas.

No mínimo 24 horas após o início da homogeneização o solo era então retirado do saco plástico e misturado a um teor definido de cal. A seguir era adicionado água e completada a mistura. Imediatamente após, a mesma era deixada por 1 hora antes de compactar.

Transcorrida uma hora a mistura úmida foi devidamente compactada no interior do molde cilíndrico, na energia Proctor modificada. Após a compactação foi removido o colarinho, onde o material excedente era rasado utilizando-se uma régua de modo a obter uma superfície nivelada com o topo do molde. A seguir era pesada a massa do conjunto molde mais amostra compactada.

Após isso, com o emprego de um extrator, retirou-se o corpo de prova do molde para então ser cortado e retirado de seu interior uma amostra, levando-se a mesma à estufa com 110° C, com o objetivo de se obter a umidade da mistura.

O procedimento de compactação se deu com diferentes teores de água, de modo a obter no mínimo cinco pontos, sendo pelo menos dois no ramo seco e dois no ramo úmido

4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO-CIMENTO

Com intuito de determinar a massa específica aparente seca máxima e umidade ótima da mistura solo-cimento, realizou-se o ensaio de compactação descrito na NBR 12023 (ABNT, 2012). A mesma descreve dois métodos aplicáveis de acordo com a granulometria do solo:

1. Método A, para solos com 100 % de partículas com diâmetro menor do que 4,75 mm.
2. Método B, para solos com até 30 % de partículas com diâmetro maior do que 19 mm.

O solo estudado apresentou mais de 98% de material passante na peneira 4,8 mm, portanto adotou-se o método A. O procedimento se deu de forma semelhante ao do solo-cal, contudo foi utilizada a energia Proctor normal.

4.5 MOLDAGEM E CURA DAS MISTURAS SOLO-CAL

A confecção dos corpos de prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento em saco plástico, armazenagem na câmara úmida e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, cal e água) com resolução de 0,01 g, o solo e a cal foram misturados com o auxílio de uma colher de pedreiro até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida foi adicionada gradualmente água durante o processo de mistura até que a massa se tornasse homogênea. A quantidade de água necessária para cada mistura foi calculada em relação à soma da massa de solo seco e da massa de cal utilizada.

Ao final do processo de mistura, duas pequenas porções eram retiradas, depositadas em canecas e colocadas em uma estufa, cuja temperatura se mantinha a 110 °C, o objetivo disto consistia na determinação do teor de umidade da mistura, onde foi adotada a média dos dois teores como sendo o teor de umidade de corpo de prova.

A seguir o material era armazenado em um saco plástico e anotada em uma planilha a hora em que houve a adição de água. O saco era fechado de modo a evitar a perda de água para o ambiente externo. A mistura (solo, cal e água) permanecia em repouso por aproximadamente uma hora, tendo sido escolhido este tempo por ser o normalmente utilizado em campo antes da compactação.

Posteriormente a mistura necessária para moldar cada corpo de prova era dividida em três partes, sendo armazenada em recipientes dotados de tampa, de modo a evitar a perda de água para o ambiente externo. Então a mistura (solo, cal e água) foi compactada, na energia Proctor modificada, em três camadas, sendo escarificada nas interfaces no interior de um molde tri-partido. Os corpos de prova após serem compactados foram retirados do molde e pesados com precisão de 0,01 g e tiveram suas dimensões medidas com precisão de 0,01 cm.

Os corpos de prova foram aceitos com base nos seguintes critérios:

- a) teor de umidade (ω): $\pm 0,5\%$ da umidade ótima
- b) altura: $10 \pm 0,2$ cm
- c) diâmetro: $5 \pm 0,2$ cm

Em seguida eram colocados para curar em sacos plásticos, devidamente identificados, e colocados na câmara úmida, com teor de umidade não inferior a 95%.

4.6 MOLDAGEM E CURA DAS MISTURAS SOLO-CIMENTO

O processo de obtenção da mistura solo-cimento foi idêntico ao solo-cal, com a diferença de que não havia necessidade de se esperar o tempo mínimo de uma hora para efetuar a compactação. Sendo assim, imediatamente após a mistura era realizada a compactação na energia Proctor normal.

Seguindo a metodologia descrita nas normas de solo-cimento, os corpos de prova foram curados por 7 dias. Foi utilizada para tanto a mesma câmara úmida do processo de solo-cal. Após o período de cura, os corpos de prova foram retirados dos sacos plásticos e submetidos a 4 horas de imersão, antes de serem levados para o ensaio de resistência à compressão simples. A figura 7 ilustra o processo de imersão dos corpos de prova em água.

Figura 7 - Corpos de prova imersos em água



Fonte: autor (2019)

4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão simples tanto das misturas solo-cal quanto solo-cimento se deu da mesma forma.

Nos corpos de prova de solo-cal, terminada a cura, os corpos de prova eram retirados dos sacos plásticos, pesados para verificar se houve perda de água, e colocados na prensa. Já nos de solo-cimento, após imersão, eram retirados, secos superficialmente com um papel absorvente, colocados na balança para verificar se houve diferença de massa, já que estavam em condição de saturação e após isso colocados na prensa.

Foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 50kN, a velocidade de deformação utilizada para a realização dos ensaios foi da ordem de 1,14mm/min. O procedimento adotado no ensaio foi conforme a NBR 12025 (ABNT, 2012).

Com base nos valores de resistência à compressão simples de cada um dos três corpos de prova, era efetuada a média aritmética, descartando-se os valores individuais de resistência que se afastem da média em $\pm 10\%$.

Após o rompimento dos corpos de prova, amostras dos mesmos foram colocadas em canecas e dispostas na estufa para posterior aferição de sua umidade. A figura 8 ilustra o ensaio.

Figura 8 - Rompimento de corpos de prova

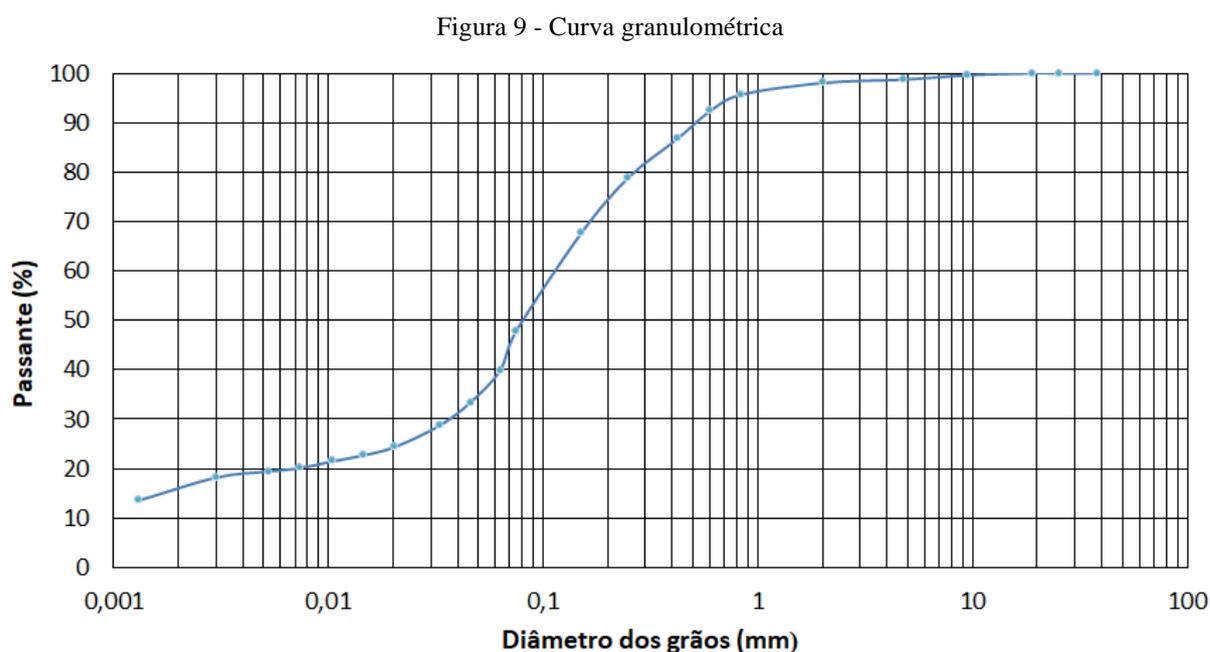


(Fonte: autor, 2019)

5. RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os ensaios de caracterização mostraram que se trata de um solo A-4 e SC-SH, de acordo com as terminologias de classificações da AASHTO e unificada respectivamente. Com um percentual de 39% passante na peneira #200 (0,0075 mm), o que denota que o solo possui quantidade considerável de finos. Na figura 9, observa-se a curva granulométrica do solo.



Fonte: autor (2019)

Desta forma classifica-se o solo como areia argilo siltosa. Quanto às características de plasticidade obteve-se 22% para o limite de liquidez e 16% para o limite de plasticidade. Conforme observa-se na tabela 4.

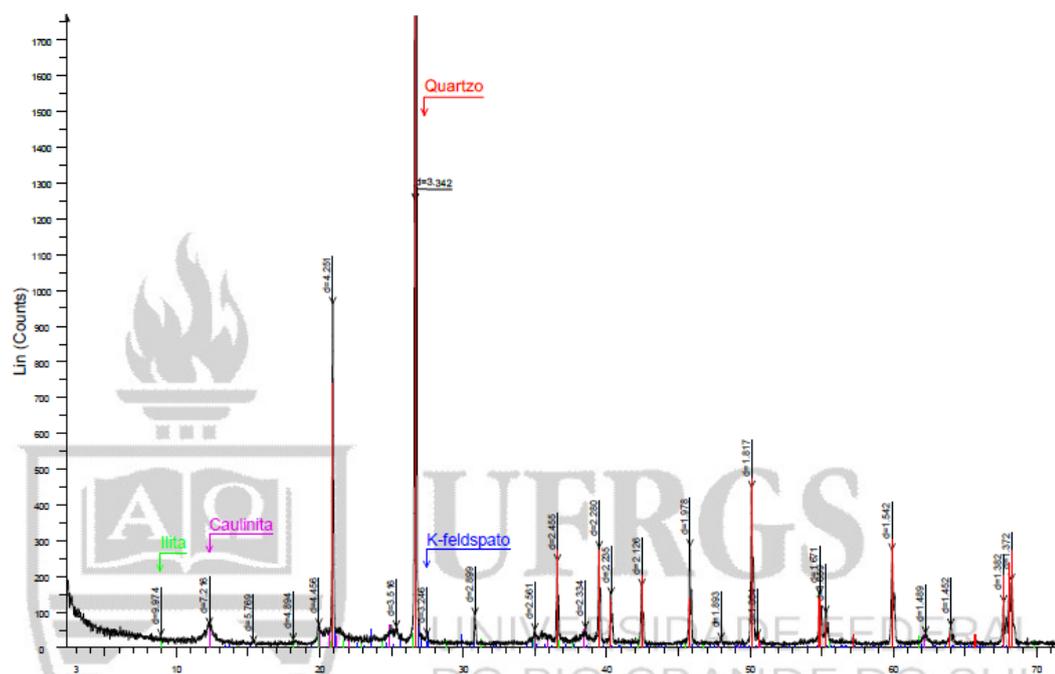
Tabela 4 - Caracterização do solo

	PROPRIEDADE	SOLO 1
	Massa específica real dos grãos	2,670
Granulometria	Argila (%)	16,00
	Silte (%)	23,00
	Areia fina (%)	35,00
	Areia média (%)	18,00
	Areia grossa (%)	6,00
	Pedregulho (%)	2,00
Plasticidade	Limite de Liquidez - LL (%)	22,00
	Limite de Plasticidade - LP (%)	16,00
	Índice de Plasticidade - IP (%)	6,00
Classificação	AASHTO	A-4
	Índice de Grupo - IG	3
	SUCS (sigla)	SC-SH
	SUCS (nomenclatura)	Areia argilo siltosa

(Fonte: autor, 2019)

Com relação a análise mineralógica, o método do pó, figura 10, fornece de uma forma mais genérica quais minerais compõem o solo, porém como a maior quantidade se refere ao quartzo, se acaba tendo certa dificuldade na quantificação dos picos menores correspondentes aos argilominerais.

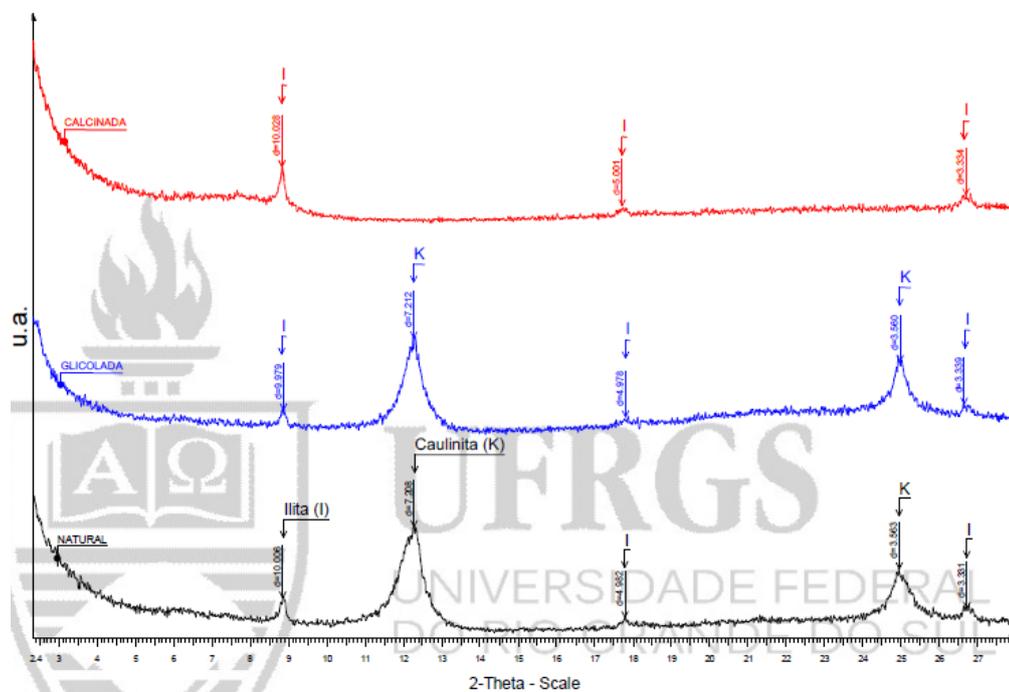
Figura 10 - Análise mineralógica - Método do pó



(Fonte: LDRX, 2019)

Visando identificar de forma melhor os argilominerais foi também realizado o método orientado, figura 11, a partir do qual foi possível identificar a presença de ilita e caulinita.

Figura 11 – Análise mineralógica - Método orientado



(Fonte: LDRX, 2019)

Por fim, com base nos dois ensaios citados foi possível estabelecer uma aproximação semi-quantitativa, conforme tabela 5, abaixo.

Tabela 5 - Análise mineralógica

Fase	Aproximação Semiquantitativa (%)
Quartzo	85,2
K-feldspato	5,8
Caulinita	5,7
Illita	3,3

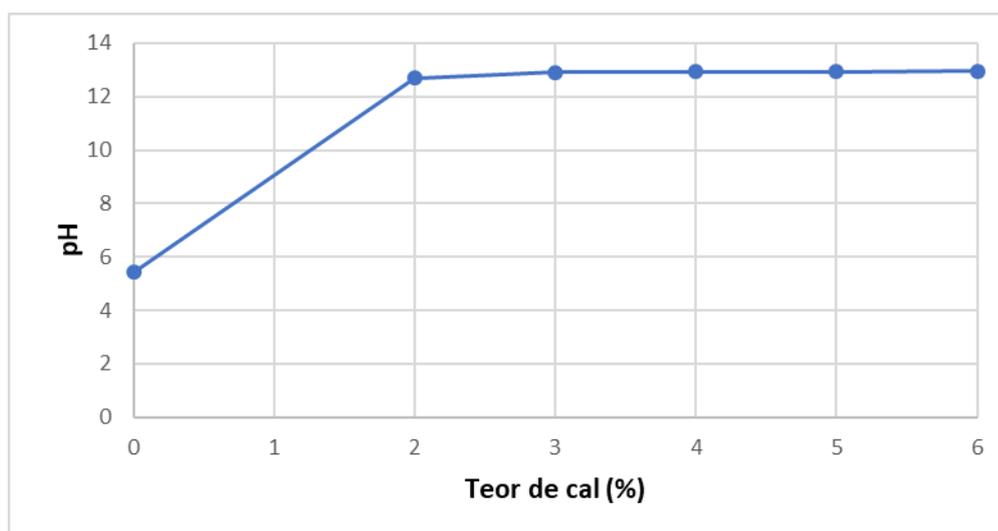
Fonte: autor (2019)

5.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CAL

Seguindo o ensaio proposto pela Norma D6276 (ASTM, 2006), percebeu-se que com 2% de cal o solo já atinge o valor necessário para a estabilização. A figura 12 apresenta os valores

obtidos pelo método do pH. O valor fornecido pela método serve como uma referência para estabelecer qual teor adotar nos testes. Decidiu-se adotar o teor de 3% de cal hidratada, para testar o valor de resistência alcançado.

Figura 12 - Resultados dos ensaios do pH

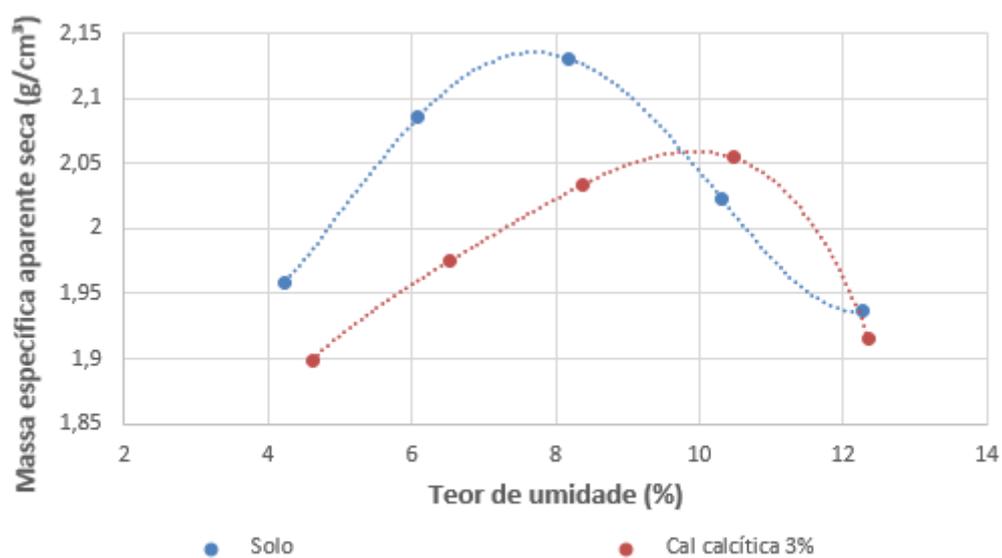


(Fonte: autor, 2019)

5.3 CURVA DE COMPACTAÇÃO SOLO-CAL

Na figura 13, observa-se que a adição de 3% de cal deslocou consideravelmente a curva de compactação para baixo e para direita, reduzindo desta forma a massa específica aparente seca da mistura e exigindo um maior teor de umidade em relação a compactação do solo natural, o que já era esperado.

Figura 13 - Curva de compactação solo-cal

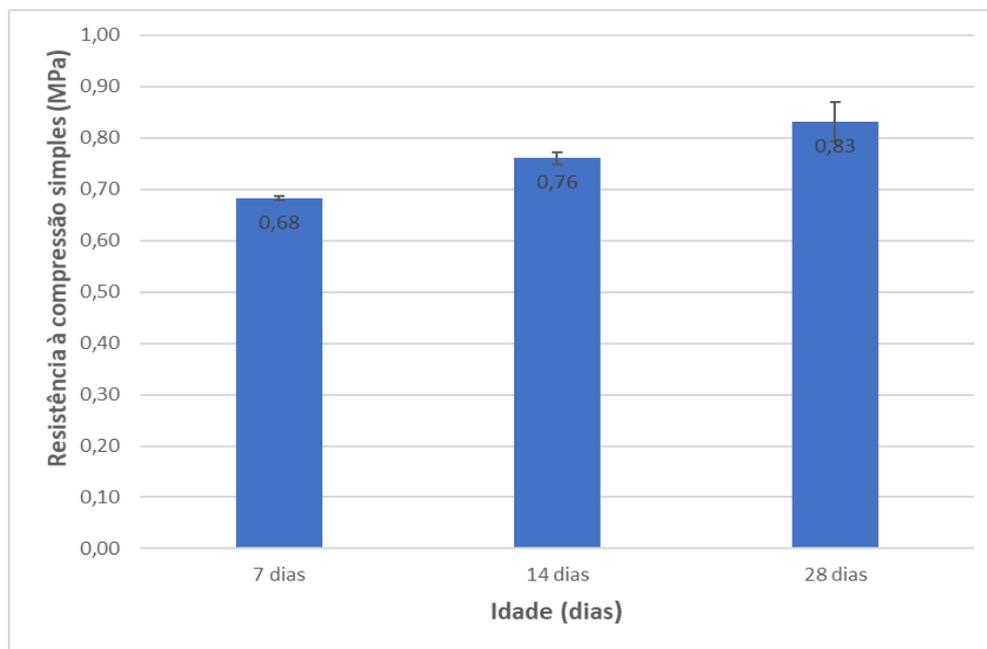


Fonte: autor (2019)

5.4 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO-CAL

A figura 14 apresenta o incremento da resistência promovido pela adição de 3% de cal. Observa-se de 830 KPa aos 28 dias de cura, já o solo natural obteve a resistência de 650 KPa. Desta forma houve um acréscimo de resistência de apenas 180KPa, mesmo utilizando-se a energia de compactação Proctor modificada. Desta forma, optou-se por não testar outros teores e seguir apenas com a estabilização com cimento.

Figura 14 - Evolução da resistência do solo com 3% de cal calcítica



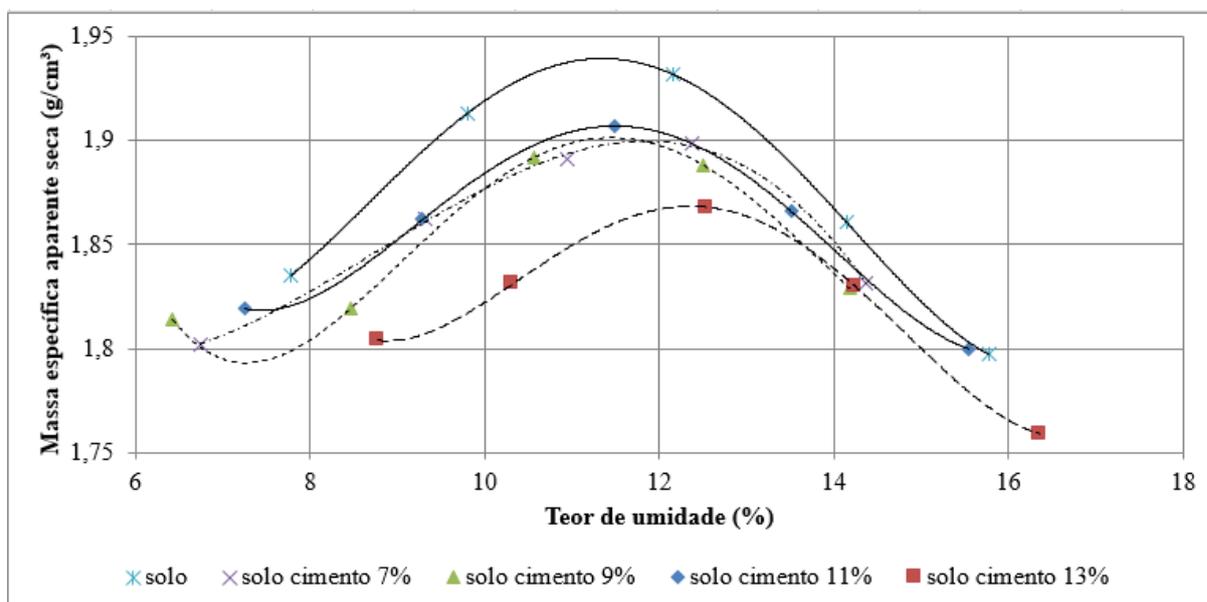
(Fonte: autor 2019)

5.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO SOLO CIMENTO

Analisando as curvas de compactação obtidas, conforme figura 15, para as amostras de solo natural e solo-cimento, percebe-se que os valores obtidos de massa específica aparente seca máxima diminuem com o aumento do teor de cimento. Já os valores de umidade ótima dos solos tratados com cimento tiveram dois comportamentos distintos. Os teores de 7%, 9% e 11% mantiveram o mesmo patamar do solo não estabilizado, Enquanto que os teores de 13% apresentaram um ligeiro aumento.

Esse deslocamento para baixo da curva de compactação em razão da adição de cimento, é consistente com a literatura, sendo um comportamento esperado para um solo com grande parcela de silte.

Figura 15 - Curvas de compactação para diferentes teores de cimento



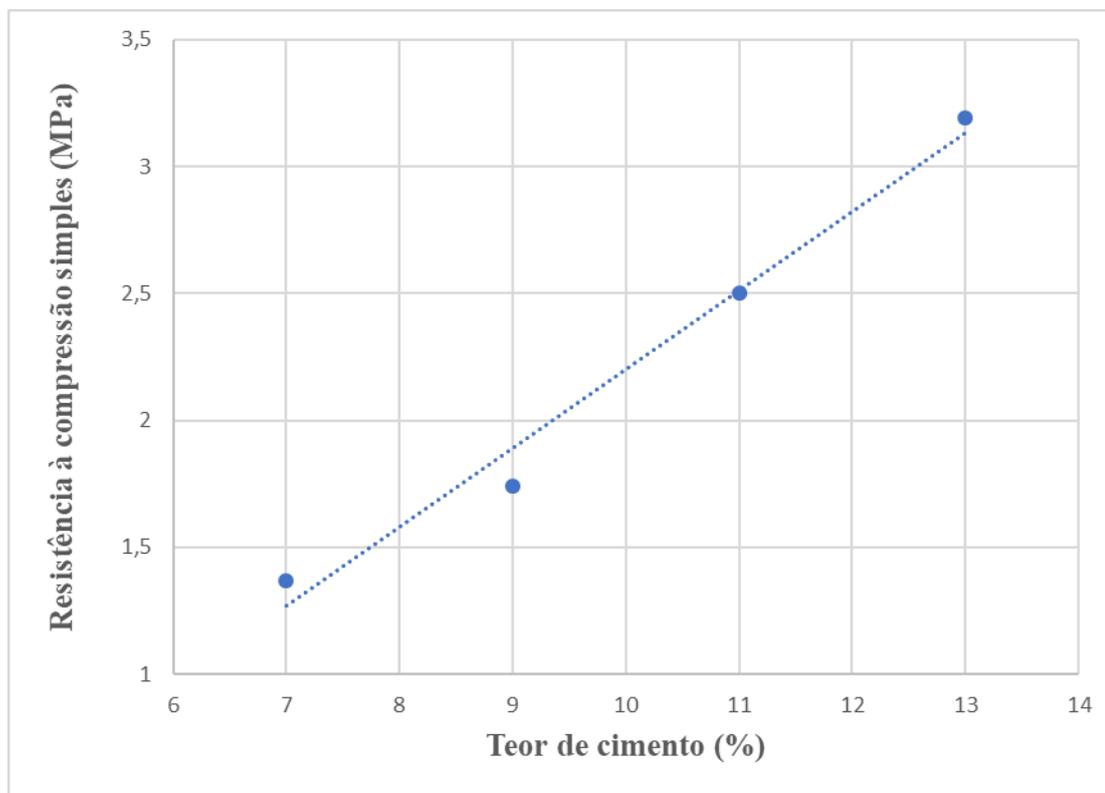
(Fonte: autor 2019)

5.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE CIMENTO

O teor de 7% estabelecido pela norma para solos A-4, não foi o suficiente para estabilizar o solo, pois o mesmo apresentou 1,37MPa, abaixo do definido. Desta forma optou-se por utilizar teores crescentes de cimento, 7%, 9% e 13%. Na figura 16 são apresentados os valores de resistência à compressão simples dos três teores de cimento testados, curados por 7 dias.

Interpolando os valores, com base na NBR 12024 (ABNT, 2012), verifica-se como sendo 10% o teor de cimento que atende ao critério de resistência mínima de 2,1 Mpa.

Figura 16 -Teor ótimo de cimento



(Fonte: autor 2019)

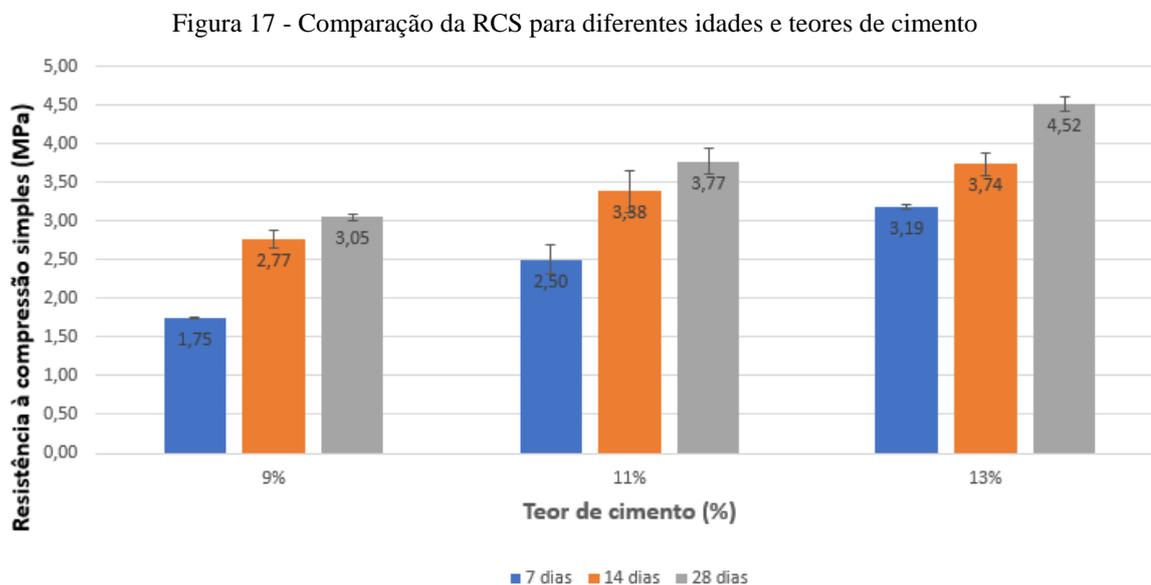
Observa-se que o solo estudado exigiu elevado teor de cimento devido a grande quantidade de material fino. Outro ponto a ser observado é que a NBR 12024 (ABNT, 2012), em sua versão anterior, de 1992, sugere como 10% o teor para solos A-4.

5.7 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA COM TEOR DE CIMENTO

O ganho de resistência com o aumento do teor de cimento é apresentado na figura 17 em que são evidenciados os valores de resistência à compressão simples que correspondem à média de três corpos de prova rompidos. A fim de verificar se os valores de resistência são representativos do ponto de vista estatístico, é apresentado também o desvio padrão.

Observa-se que a resistência à compressão simples aumentou cerca 1,0 MPa para o teor de 9% de cimento no período de 7 a 14 dias, enquanto que entre 14 e 28 dias com o mesmo teor, a resistência cresceu 0,23 MPa. O teor de 11% apresenta um comportamento semelhante, porém com crescimento entre 7 e 14 dias de 0,88 MPa. Por fim, o teor de 13% apresenta um

ganho de resistência de 7 para 14 dias de 0,55 MPa, menor que os demais teores para o mesmo período. De modo geral, observa-se um aumento, entre 7 e 28 dias de cura, de cerca de 1,2 MPa, independente do teor.



Fonte: autor (2019)

Percebe-se pela figura 18, um comportamento linear no aumento da resistência em função do teor de cimento. Com base nisso é possível gerar as curvas que mais se adaptam ao comportamento apresentado, conforme equações abaixo:

Tempo de cura de 28 dias

$$RCS = - 0,4167 + 0,38 (\% \text{ Cim}) \quad R^2 = 0,99$$

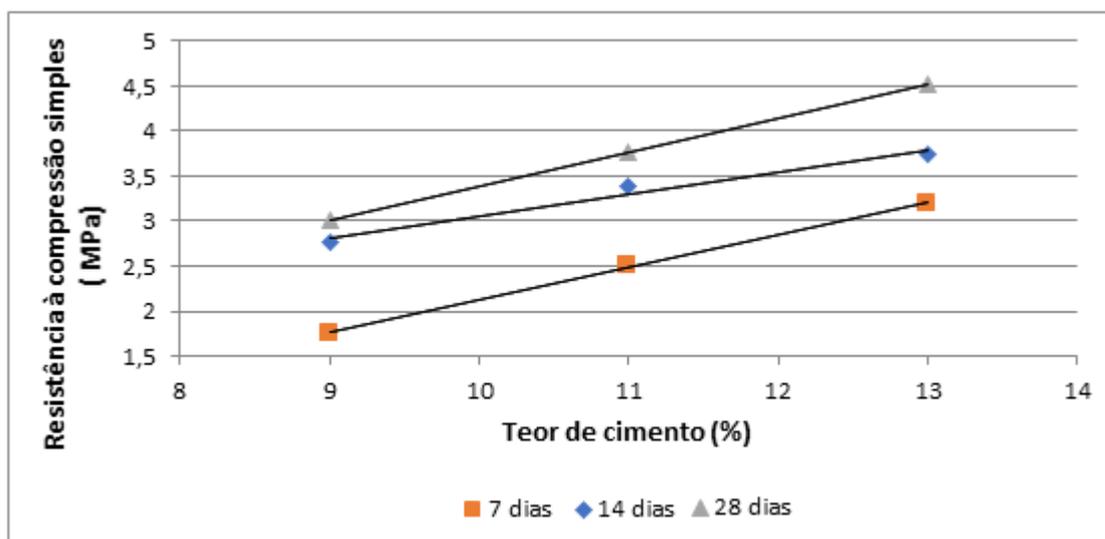
Tempo de cura de 14 dias

$$RCS = 0,6292 + 0,24 (\% \text{ Cim}) \quad R^2 = 0,98$$

Tempo de cura de 7 dias

$$RCS = 1,48 + 0,36 (\% \text{ Cim}) \quad R^2 = 0,98$$

Figura 18 - Variação da resistência com teor



(Fonte: autor, 2019)

Analisando os coeficientes angulares, os quais representam a taxa de acréscimo de resistência com o teor de cimento das curvas, nota-se que o crescimento da resistência se dá de forma mais acentuada para curva de 28 dias.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mistura solo-cal com o teor de 3%, mesmo na energia modificada, se mostrou ineficiente para estabilização do solo, uma vez que o acréscimo de resistência à compressão simples do solo aos 28 dias foi 180 kPa, inferior ao estabelecido no método de Thompson. Como o solo possuía características que o definiam apto a estabilização com cimento, optou-se pela última, no entanto considera-se elevada a quantidade de cimento que o solo requereu para estabilização. Essa quantidade justifica-se possivelmente à quantidade elevada de finos, principalmente de siltes no solo, o que acabou por requerer um teor elevado de cimento. Vale lembrar que as normas de solo-cimento utilizadas estabelecem a compactação apenas na energia proctor normal. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação também da influência de outras energias de compactação na resistência à compressão simples, buscando com isso confirmar a hipótese de que um menor teor de cimento é necessário para a estabilização do solo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5102**: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures Active Standard (Método de Teste Padrão para Resistência à Compressão Não-Confinada de Misturas de Cal Solo-Cal Compactado Padrão Ativo). West Conshohocken / Usa: American Society For Testing And Materials, 2009. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6276 - 99A**: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization Superseded (Método de Teste Padrão para Usar o pH para Estimar o Requisito de Proporção de Solo-Cal para Estabilização do Solo Substituído). 99 ed. West Conshohocken / Usa: American Society For Testing And Materials, 2006. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798**: MATERIAIS PARA BASE DE SOLO-CIMENTO — REQUISITOS. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: SOLO-CIMENTO — ENSAIO DE COMPACTAÇÃO. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: SOLO-CIMENTO — MOLDAGEM E CURA DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS — PROCEDIMENTO. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: SOLO-CIMENTO — ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS — MÉTODO DE ENSAIO. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: SOLO-CIMENTO — DOSAGEM PARA EMPREGO COMO CAMADA DE PAVIMENTO — PROCEDIMENTO. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: AMOSTRAS DE SOLO — PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: GRÃOS DE PEDREGULHO RETIDOS NA PENEIRA DE ABERTURA 4,8 MM - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE E DA ABSORÇÃO DE ÁGUA. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: SOLO - DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: SOLO — DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: SOLO - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

AZEVEDO, A. L. C. et al. **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Revista Vias Gerais: Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais, v. 1, n. 2, p.47-56. 1998.

CANCIAN, M. A.. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo cimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do Paraná**. 2013. 202 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

CARVALHO, J. B. Q. **Propriedade e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal**. 22ª Reunião Anual de Pavimentação, ABVp. Florianópolis, SC, p. 689 - 706. 1988.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquióxidos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização)**. 1995. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CUNHA, J. E. V.. **Solos lateríticos estabilizados com cimentos através da metodologia da ABCP**. 1992. 151 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - ME. **DNER-ME 093/94: Determinação da Densidade Real**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994.

GONÇALVES, M. R. F. **Solo-cimento: estudo de jazidas de solo estabilizáveis com cimento na zona sul do estado do Rio Grande do Sul**. 1989. 139 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

LILLEY, A. A.; B., In: Bell; F. G.. **Stabilisation os soil by cement**. 1975. Tese (Doutorado). Methods Of Treatment Of Unstable Ground, London: Butterworhs.

LITTLE, D. N. **Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime**. Published By Kendall/hunt Publishing Company, 1995.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NÚÑES, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils.** Transportation Research Record, Washington D. C., n. 1652, p.215-227, 1999.

Sistema Nacional de Viação. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil.** Ground Improvement, n. 2, p.27-32, 1998.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division. v.92, p. 67-92. 1966.

TRB, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division. v.92, p. 67-92. 1966.