CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MELHORAMENTO DO SOLO RESIDUAL DE LAJEADO COM A ADIÇÃO DE CAL

Estevo José Baraldi Corteleti

Lajeado, novembro de 2013

Estevo José Baraldi Corteleti

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

MELHORAMENTO DO SOLO RESIDUAL DE LAJEADO COM A ADIÇÃO DE CAL

Trabalho apresentado na disciplina de TCC - Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.
Área de concentração: Geotecnia.

ORIENTADORA: Emanuele Amanda Gauer

Lajeado, novembro de 2013

Estevo José Baraldi Corteleti

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

MELHORAMENTO DO SOLO RESIDUAL DE LAJEADO COM A ADIÇÃO DE CAL

A Banca examinadora abaixo aprova o Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Profa. Ma. Emanuele Amanda Gauer - orientadora
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. João Batista Gravina
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, novembro de 2013

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Dedico este trabalho aos meus pais, Miguel e Cemilda e
a minha irmã Jaqueline.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, que sempre esteve presente, me incentivando e me apoiando com muito amor e carinho.

A minha namorada Janaíne pela companhia nas horas de estudo, pela compreensão nos finais de semana e pelo apoio em momentos difíceis.

A Profa. Emanuele Amanda Gauer pela dedicação na orientação deste trabalho, pelo incentivo e ensinamentos transmitidos.

A todos os meus colegas e laboratoristas, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

RESUMO

O solo, devido à sua abundância, tem grande emprego na construção civil e na engenharia rodoviária. Este solo deve apresentar certas propriedades físicas e químicas para conferir estabilidade e suportar aos esforços e cargas a que será submetido e, nem sempre, estas condições são atendidas na sua condição de campo. A técnica de estabilização de solos tem sido amplamente utilizada na área da Engenharia Civil para proporcionar a melhoria de suas propriedades mecânicas. Neste contexto, fica evidente a importância do estudo das técnicas de melhoramento do solo para obras de engenharia, proporcionando maior segurança, confiabilidade e menores custos. O presente trabalho propõe uma solução para a estabilização de solos usando cal. Como experimentação, realizou-se ensaios de caracterização e compressão simples com amostras de solo coletadas no município de Lajeado, RS, com adição de cal nas porcentagens de 5, 7, 9 e 11%. Obteve-se um aumento da resistência de forma linear com o aumento do teor de cal para o tipo solo utilizado. A densidade de compactação provou ser um parâmetro fundamental para estimar a resistência de amostras solo-cal.

Palavras-chave: Melhoramento de solos. Estabilização química. Solo-cal. Vale do Taquari.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

ABSTRACT

The soil, due to its abundance, takes great use in construction and road engineering. This soil must have certain physical and chemical properties to provide stability and support efforts and loads to which it will be submitted and, not always, these conditions can be satisfied in its field condition. The technique of soil stabilization has been widely used in the field of Civil Engineering to provide the improvement of soils mechanical properties. In this context, it is evident the importance of studying the techniques of soil improvement for engineering projects, providing greater security, reliability and lower costs. This paper proposes a solution for soil stabilization using lime. Experimentally, were performed tests of characterization and uncontained compression with soil samples collected in the city of Lajeado, RS, with the addition of 5, 7, 9 and 11% percentages. The results showed a linear increase in resistance with the increase of lime content. The compaction density proved to be a fundamental parameter in estimating the strength of lime-soil samples.

Keywords: Soil improvement. Chemical stabilization. Soil-lime. Vale do Taquari.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que influenciam as reações solo-cal 22
Figura 2 – Mecanismo de troca de cátions 26
Figura 3 – Mecanismo de estabilização solo-cal 27
Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples 29
Figura 5 – Efeito da porcentagem de cal em amostras com sete dias de cura 31
Figura 6 – Amostra de solo 33
Figura 7 – Local da coleta da amostra de solo 34
Figura 8 – Instrumento de difração a laser 35
Figura 9 – Aparelho de Casagrande 36
Figura 10 – Corpo de prova moldado para a realização de ensaios de compressão 40
Figura 11 – Corpos de prova ensacados para evitar perda de umidade 40
Figura 12 – Prensa para ensaio de compressão simples 42
Figura 13 – Gráfico de distribuição granulométrica 43
Figura 14 – Gráfico do ensaio para determinação do limite de liquidez 44
Figura 15 – Gráfico da relação teor de umidade x peso específico aparente seco 46
Figura 16 – Gráfico da relação teor de cal x pH 47
Figura 17 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão simples 50
Figura 18 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão em amostras com o mesmo teor de umidade 51
Figura 19 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão simples em amostras com o mesmo peso específico aparente seco 52

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de estabilização 19
Tabela 2 – Valores obtidos no ensaio para determinação do Limite de Plasticidade 44
Tabela 3 – Determinação do peso de solo e de água nas amostras com diferentes teores de umidade 45
Tabela 4 – Relação teor de umidade x peso específico seco das amostras 45
Tabela 5 – Determinação do pH das amostras com adição de cal 46
Tabela 6 – Especificações dos corpos de prova moldados com γd = 1,2424 e W = 30%, após 28 dias de cura 48
Tabela 7 – Especificações dos corpos de prova moldados com γd = 1,30 e W = 30%, após 28 dias de cura 48
Tabela 8 – Especificações dos corpos de prova moldados com γd = 1,2424 e W = 35%, após 28 dias de cura 49

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO:	American Association of State Highway Transportation Officials
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNH:	Banco Nacional de Habitação
CP:	Corpo de Prova
DNER:	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
LL:	Limite de Liquidez
LP:	Limite de plasticidade
NBR:	Norma Brasileira Regulamentadora
SUCS:	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

LISTA DE SÍMBOLOS

δ : Massa específica real dos grãos

γ : Peso específico natural

γ_d: Peso específico aparente seco

w: Teor de umidade

$w_{ót}$: Teor de umidade ótimo (%)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivos do trabalho 14
1.1.1 Objetivo principal 15
1.1.2 Objetivos secundários 15
1.2 Hipótese 15
1.3 Delimitação 15
1.4 Organização do trabalho 15

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
2.1 Resistência do solo 16
2.1.1 Cisalhamento 17
2.1.2 Atrito 17
2.1.3 Coesão 17
2.2 Estabilização de solos 18
2.2.1 Estabilização química 19
2.3 Técnica Solo-Cal 20
2.3.1 Materiais utilizados 22
2.3.2 Dosagem 24
2.4 Comportamento da mistura Solo-Cal 25
2.4.1 Variáveis 27
2.4.2 Comportamento 30

3 MATERIAIS E MÉTODOS 32
3.1 Materiais 32
3.1.1 Solo 32
3.1.2 Cal 33
3.1.3 Água 33

3.2 Métodos 33
3.2.1 Coleta do solo a ser estudado 34
3.2.2 Estudo granulométrico 34
3.2.3 Limites de consistência 35
3.2.4 Compactação 37
3.2.5 Determinação do teor de cal 38
3.2.6 Moldagem dos corpos de prova (CP) 39
3.2.7 Tempo de cura 41
3.2.8 Ensaio de resistência à compressão simples 41

4 RESULTADOS E ANÁLISE 43
4.1 Caracterização Geotécnica Básica 43
4.2 Teor de umidade e compactação 45
4.3 Teor de cal 46
4.4 Ensaios de resistência à compressão simples 47

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 53

REFERÊNCIAS 55

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

1 INTRODUÇÃO

O solo, devido à sua abundância, tem grande emprego na construção civil e na engenharia rodoviária (CORRÊA, 2008). Este deve apresentar certas propriedades físicas e químicas para conferir estabilidade e suportar aos esforços e cargas a que será submetido e, nem sempre, estas condições são atendidas na sua condição de campo (INGLES & METCALF, 1972). Assim, torna-se de fundamental importância o conhecimento de técnicas e processos que levem à melhoria de suas propriedades.

O melhoramento e a estabilização do solo são empregados em diversas obras de engenharia, como: bases e sub-bases para pavimentos, aterros, taludes e fundações (GUIMARÃES, 2002). O conhecimento da estrutura a ser implantada e o estudo do solo disponível são imprescindíveis para a determinação do processo de estabilização a ser empregado, assim como, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e o grau de compactação a ser atingido, tendo como objetivos reduzir futuros recalques, aumentar a rigidez e a resistência do solo (INGLES & METCALF, 1972).

A adição de agentes cimentantes é utilizada em base de rodovias ou em fundações de edificações. Resultados de ensaios de laboratório e de campo mostram que a inserção de determinados teores de cal em solos altera a rigidez, a resistência e o seu comportamento (GUIMARÃES, 2002). Dessa forma fica evidente a importância do estudo das técnicas de melhoramento do solo para obras de engenharia, proporcionando maior segurança, confiabilidade e menores custos.

Segundo Guimarães (2002), a técnica de reforço de solos através da estabilização com a utilização de cal vem sendo objeto de pesquisas em vários países ao longo dos últimos anos. No entanto, ainda não foram realizados estudos com amostras de solo do município de Lajeado/RS.

1.1 Objetivos do trabalho

Os objetivos são divididos em objetivo principal e objetivos secundários.

1.1.1 Objetivo principal

Aprofundar os conhecimentos sobre o método de estabilização de solos com a adição de cal.

1.1.2 Objetivos secundários

a) Avaliar os efeitos da utilização de diferentes dosagens de cal nas propriedades mecânicas de uma amostra de solo coletada na cidade de Lajeado/RS;
b) Verificar a influência da variação do peso específico aparente seco e da umidade na resistência mecânica das misturas de solo-cal.

1.2 Hipótese

Com a adição de cal e alteração no teor de umidade o solo analisado terá suas características mecânicas modificadas, obtendo maior resistência.

1.3 Delimitação

Foram realizadas análises com amostras de solo coletadas no Campus do Centro Universitário Univates em Lajeado/RS. Foram utilizados teores de cal e teores umidade para a avaliação do melhoramento das características mecânicas do solo quanto à sua resistência, através de ensaios de compressão simples.

1.4 Organização do trabalho

A presente pesquisa é estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 2, intitulado revisão bibliográfica, são abordados pressupostos sobre solos, como as técnicas solo-cal utilizadas atualmente, métodos de caracterização dos materiais utilizados e comportamento da mistura solo-cal.

O Capítulo 3 aborda os materiais utilizados e os métodos adotados para a realização da pesquisa, são especificadas as variáveis de interesse, os métodos e materiais. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, uma discussão destes e a análise do efeito de cada variável estudada.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para futuras pesquisas.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo direciona-se à obtenção de informações sobre a mistura solo-cal, materiais que a compõe e método de dosagem existentes na literatura. Busca-se também verificar o comportamento dos solos cimentados e quais propriedades sofrem alterações neste processo.

2.1 Resistência do solo

Segundo Caputo (2000), "a propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da resistência ao cisalhamento do solo; toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida". Este cisalhamento está diretamente ligado à ação integrada de dois fatores denominados atrito e coesão.

Modifica-se o ângulo de atrito ou a coesão, ou ambos, quando se pretende aumentar a resistência do solo. Os valores desses parâmetros dependem, principalmente, de três fatores: granulometria[1], compacidade[2] e umidade (SOUZA PINTO, 2006).

Segundo Souza Pinto (2006) a fração grossa (pedregulho e areia) do material entra como elemento inerte, contribuindo para o atrito interno e, a fina, como elemento aglutinante influindo na coesão. As propriedades esperadas podem ser obtidas pela compactação, não só quanto à resistência, mas também quanto a sua permeabilidade e compressibilidade. A alteração da umidade influencia predominantemente na coesão dos solos, evidenciando a importância da fração fina do solo sobre o seu comportamento (MACHADO, 1997).

Para Caputo (2000), quando há a necessidade do melhoramento do solo pode-se utilizar a estabilização por adição de aglutinantes. Neste processo, aplica-se ao solo uma substância que aumente a sua coesão ou que o impermeabilize, impedindo a diminuição da sua resistência pela ação da água, como o cimento ou a cal.

---

[1] Granulometria: dimensões das partículas de uma determinada amostra do solo (CAPUTO, 2000).
[2] Compacidade: índice utilizado para determinar o grau de compactação de um material granular (CAPUTO,2000).

2.1.1 Cisalhamento

Craig (2011) destaca que, “se em um ponto de qualquer plano dentro de uma massa de solo a tensão cisalhante se tornar igual à resistência ao cisalhamento do solo, então ocorrerá ruptura nesse ponto”. O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre corpos sólidos ou entre partículas do solo, sendo que, os principais fenômenos que permitem menor ou maior deslizamento são o atrito e a coesão (SOUZA PINTO, 2006).

2.1.2 Atrito

Segundo Machado (1997) o ângulo de atrito do solo está associado ao efeito de entrosamento entre as suas partículas que o compõe. Coulomb, autor das leis de atrito, obteve suas equações a partir de observações empíricas e, posteriormente, Terzaghi elaborou uma teoria que fornece embasamento teórico para as constatações empíricas destas leis.

Terzaghi constatou que a superfície de contato real entre dois corpos constitui apenas uma parcela da superfície aparente de contato, dado que em um nível microscópico, as superfícies dos materiais são efetivamente rugosas. O contato entre as partículas se dá então apenas nas protuberâncias mais salientes. Sendo assim, as tensões transmitidas nos contatos entre as partículas de solo são de valor muito elevado, sendo razoável admitir que haja plastificação do material na área dos contatos entre as partículas (MACHADO, 1997).

A resistência por atrito entre as partículas depende do coeficiente de atrito, este, pode ser definido como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano em outro paralelamente a este. O ângulo de atrito é o ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças tangencial e normal, sendo, o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a força normal ao plano, sem que haja deslizamento (SOUZA PINTO, 2006).

2.1.3 Coesão

“A coesão consiste na parcela de resistência de um solo que existe independentemente de quaisquer tensões aplicadas e se mantém, ainda que não necessariamente em longo prazo, se todas as tensões aplicadas ao solo forem removidas” (MACHADO, 1997). Várias fontes podem originar coesão em um solo. A cimentação, por exemplo, proporcionada por carbonatos, sílica, óxidos de ferro, dentre outras substâncias, pode resultar em altos valores de coesão.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

2.2 Estabilização de solos

A estabilização de solos consiste na utilização de processos de natureza física, química, físico-química ou mecânica (natural ou artificial), com a finalidade de alterar as características dos solos. Este processo visa melhorar o seu comportamento quanto à utilização como material em obras de engenharia, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

Ingles & Metcalf (1972) afirmam que o solo natural é um material complexo e variável, porém, devido a sua grande disponibilidade e seu baixo custo de obtenção, torna-se viável a sua utilização. Defendem ainda que três alternativas podem ser adotadas neste processo:

a) Aceitar o material do local como ele é, e projetar considerando e conhecendo as restrições impostas por sua qualidade;
b) Remover o material do local e substituir por um material com propriedades melhores;
c) Alterar as propriedades do solo para criar um novo material capaz de atender as exigências.

Segundo Corrêa (2008), a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo número e variedade de solos sobre os quais esta provou ter uma ação efetiva. Deve-se também verificar que a estabilização não é necessariamente um processo infalível, através do qual, toda e qualquer característica do solo é alterada. Uma aplicação correta exige assim a identificação clara de quais propriedades do solo se pretende melhorar, dentre as quais destacam-se, o controle da expansibilidade, a resistência, a durabilidade dessa resistência e a permeabilidade (CRISTELO, 2001).

As alternativas de estabilização disponíveis para o controle da expansibilidade podem ser resumidas em transformar o solo em uma massa rígida, cujas partículas, por estarem cimentadas, resistem às pressões de expansão das argilas ou mesmo, restringir a percolação da água dentro do solo, através da obstrução dos poros (CORRÊA, 2008). Para a primeira alternativa, Ingles & Metcalf (1972) sugerem os tratamentos térmicos e químicos, como o emprego da cal.

Outros solos, no seu modo natural, apresentam baixa resistência ou acentuada deformabilidade, o que pode dificultar a sua utilização. A compactação e a correção granulométrica, com a utilização da cal, por exemplo, são as formas mais comuns de estabilização utilizadas neste caso. O processo químico tem se mostrado eficiente em estudos

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

realizados sobre a sua aplicação para o enrijecimento de solos argilosos muito úmidos (INGLES & METCALF, 1972).

Os problemas de permeabilidade do solo podem ser geralmente corrigidos através da drenagem, compactação e estabilização química. Em alguns casos em que é necessário o aumento da permeabilidade, a mistura do solo com floculantes (como a cal) ou areia é a única alternativa (CORRÊA, 2008).

Na Tabela 1 são apresentados métodos de estabilização para os principais grupos de solos, juntamente com as razões para a preferência de determinado estabilizante.

Tabela 1 – Métodos de estabilização

Principal Componente do Solo	***Estabilizante Recomendados***	***Motivo***
Matéria Orgânica	Mecânica	Outros métodos ineficientes
Areias	Argila	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Maior densidade e coesão
	Betume	Maior coesão
Alofanas	Cal	Reações pozolânicas e densificação
Caulinitas	Areia	Maior estabilidade mecânica
	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Illitas	Cimento	Ganho rápido de resistência
	Cal	Ganho rápido de trabalhabilidade e resistência a longo prazo

Fonte: Adaptado de Ingles & Metcalf (1972, p. 34)

Cada aditivo interage com o solo de uma forma particular, seja através de cimentação, modificação da mineralogia, troca de íons, precipitação, polimerização, etc. O conhecimento do princípio de atuação da substância adicionada, bem como das características do material a ser tratado, são fundamentais para o sucesso da estabilização.

2.2.1 Estabilização química

A mistura de solos com alguns componentes químicos como, por exemplo, a cal, para o seu melhoramento, é caracterizada como estabilização química. Casanova (2004) comenta que, no Brasil, estabilização química começou a ser empregado em obras civis a partir de 1948 para a confecção de bases e sub-bases de pavimentos. No entanto, sua utilização em

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

moradias somente iniciou-se por volta de 1978, quando o BNH[3] aprovou a técnica para construções de habitações populares, tendo uma redução de custos de 20 a 40%, comparando com o modo tradicional.

Segundo Guimarães (2002) a opção pelo método de estabilização com a utilização de aditivos químicos é influenciada por um serie de fatores, dentre eles, os econômicos, a finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas. Além disso, o autor descreve que há solos de algumas das regiões tropicais úmidas que recebem tratamento deficiente devido às significativas diferenças entre suas propriedades e comportamento, exigindo um número maior de estudos e pesquisas para se chegar aos procedimentos mais apropriados.

A estabilização química, quando utilizada para solos granulares, visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento, causado pelo atrito produzido pelo contato entre as partículas, por meio da adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o cimento Portland, a cal, materiais betuminosos e resinas (MARQUES, 2004).

José Filho (2002) analisou o comportamento dos solos utilizados na construção de trechos de pavimentos experimentais com a adição de cal. Essa análise restringiu-se aos ensaios de limites de consistência e resistência à compressão simples para teores de cal de 3, 5, 7% e com tempos de cura de 7, 28, 63 dias para as três energias, normal, intermediária e modificada. Com a análise dos resultados, concluiu que os valores da resistência da mistura solo-cal foram maiores com a influência da energia de compactação do que com o aumento do teor de cal, porém, para os limites de consistência, com a adição da cal, os índices de plasticidade diminuíram, melhorando a sua trabalhabilidade.

Wesseling (2002) estudou a influência do tempo de cura na resistência à compressão simples de misturas de solo-cal, usando um teor de 11% de aditivo. Os resultados encontrados foram de 1167 kPa para 7 dias, aumentando para 2232 kPa para 90 dias. Observou também, que todas as misturas ganharam maior resistência nos períodos de 7 a 28 dias.

2.3 Técnica Solo-Cal

Azevêdo (2010) define solo-cal como sendo uma mistura íntima de solo, cal e água em proporções determinadas através de ensaios em laboratório. Segundo ele a aplicação dessa

[3] BNH: Banco Nacional de Habitação - Banco público, brasileiro, voltado ao financiamento e à produção de empreendimentos imobiliários.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

técnica é fundamentada em reações químicas e físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a argila.

Guimarães (2002) apresenta os seguintes relatos com a utilização de sol-cal em pistas experimentais no Brasil:

a) Aeropotro de Congonhas (São Paulo) – na área de hangares da Varig (10.000 m²) foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada, e um solo classificado pelo sistema de classificação da AASHTO[4] como A-7-5, IP[5] igual a 12. O material apresentou resistência à compressão simples de 1,5 MPa aos 28 dias;
b) Rodovia Curitiba/ Porto Alegre – próximo ao km 10, no Estado do Paraná, com 1000 metros de extensão. Foi utilizado um solo siltoso, com 3% e 7% de cal;
c) Rodovia Brasília/ Fortaleza – nas proximidades de Sobradinho/DF foram executados dois trechos de 150 m cada, base com 1% e 3% de cal, e sub-base em solo laterítico (LL[6] = 41% e IP = 11%);
d) Avenida Sernambetiba (Rio de Janeiro, Guanabara) – trecho de 18km com base de solo-cal. Utilizou-se um solo com 25% a 33% retido na #200 e os teores de 3% e 4% de cal;
e) Rodovia Cruz-Alta/ Carazinho (BR-377/RS) – 2 trechos experimentais em solo argiloarenoso e 4% de cal cálcica.

Ingles & Metcalf (1972) destacam que a adição de agentes cimentantes, como a cal, é uma técnica de estabilização de solos que visa melhorar suas propriedades mecânicas. Utiliza-se solo-cal quando não se disponibiliza de um material com as características adequadas ao projeto. Esta técnica é muito utilizada em pavimentação, controle de erosão, estabilização de encostas e reforço de camadas superficiais de solo.

O solo-cal possui muitas vantagens quando aplicado como base de pavimentos semi-rígidos: é resistente e econômico, minimiza pressões no subleito, é pouco deformável, quando submetido a carregamento e não perde resistência na presença de água. Entretanto, é necessário que se leve em consideração o aspecto da reflexão de trincas no revestimento betuminoso (KUHLMAN, 1994 *apud* BONAFÉ, 2004).

A técnica solo-cal também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade. Tais

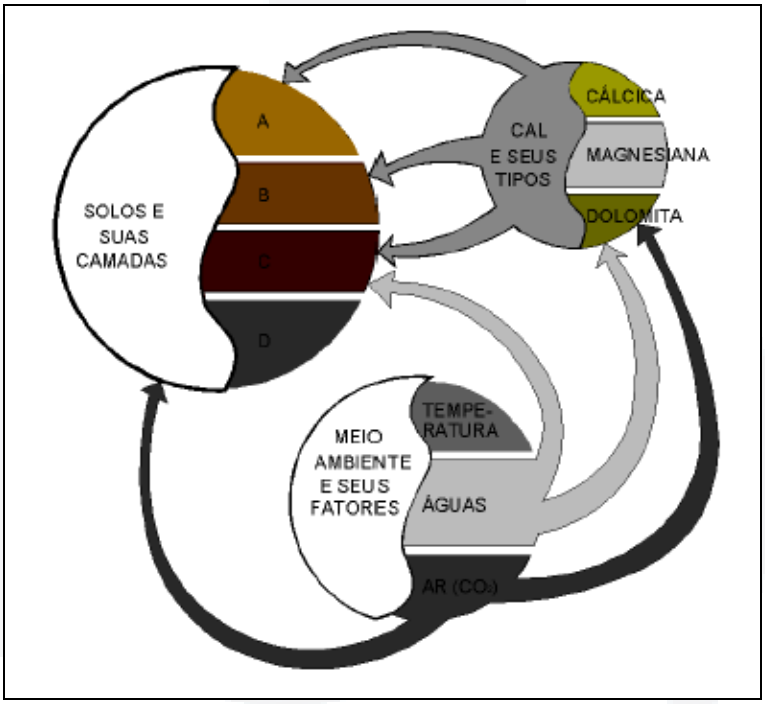
[4] AASHTO: American Association of State Highway Transportation Officials.
[5] IP: Índice de Plasticidade.
[6] LL: Limite de Liquidez.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

condições são problemáticas na medida em que podem causar patologias nas edificações (INGLÊS E METCALF, 1972).

Segundo Guimarães (2002) a técnica solo-cal baseia-se na inter-relação entre os elementos constituintes do solo, a cal e os componentes presentes no meio ambiente. Esta interdependência se traduz em reações químicas físico-químicas que ocorrem entre o solo e a cal. A Figura 1 esquematiza esta interdependência.

Figura 1 – Fatores que influenciam as reações solo-cal



Fonte: Guimarães (2002, p. 180)

2.3.1 Materiais utilizados

Uma descrição dos materiais e as características que estes devem possuir para a sua utilização em misturas de solo-cal encontram-se a seguir.

2.3.1.1 Solo

Segundo Guimarães (2002), solo pode ser definido como sendo um corpo natural, tridimensional, formado de horizontes (camadas aproximadamente paralelas à superfície) e constituído de elementos orgânicos e minerais. Possui três fases, sólida (minerais e

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

orgânicos), líquida (água que preenche os espaços entre as partículas) e gasosa (que ocupa os espaços não preenchidos por água).

Os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas por desintegração mecânica ou decomposição química. Por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formam-se pedregulhos e areias (solos de partículas grossas), siltes (partículas intermediárias) e, somente em condições especiais, as argilas (partículas finas) (CAPUTO, 2000).

Ingles & Metcalf (1972) descrevem que a cal tem pouco efeito em solos compostos basicamente por material orgânico e com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Esta é mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetiva que o cimento em pedregulhos argilosos.

Deve-se levar em consideração a granulometria e a plasticidade do solo para a determinação de qual aditivo é mais indicado para o processo de estabilização química. Solos que apresentam média ou alta plasticidade são mais reativos a cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994 *apud* DALLA ROSA, 2009).

2.3.1.2 Cal

Segundo Guimarães (2002) a cal é um aglomerante resultante da calcinação[7], em temperaturas próximas de 1000 ºC, das rochas carbonatadas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio. Este processo de calcinação do carbonato de cálcio e do cálcio-magnésio resulta, respectivamente, na formação da cal virgem e da cal viva.

A cal hidratada é obtida através da hidratação adequada da cal virgem e é a mais utilizada no processo de estabilização do solo. Esta cal é classificada de acordo com a NBR 7175/2003[8], em função de sua composição química, como: CHI, CHII e CHIII. A principal diferença entre esses tipos de cales encontra-se nos teores de cálcio (maiores na CHI) e nos teores de carbonato (menores na CHI) (GUIMARÃES, 2002).

[7] Calcinação: Reação química de decomposição térmica que resulta na formação da cal e do dióxido de carbono (GUIMARÃES, 2002).
[8] ABNT NBR 7175/03: Cal hidratada para argamassas – Requisitos.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

2.3.1.3 Água

A presença de umidade, na forma de uma camada de água envolvendo as partículas de solo, é necessária para que ocorram reações entre o solo-cal. Como a água é apenas o meio onde ocorrem estas reações, torna-se evidente que um excesso de água irá atrapalhar estas reações, pois afastará as partículas umas das outras, prejudicando as forças de atração iônicas existentes (AZEVÊDO, 2010).

Azevêdo (2010) também destaca a importância da presença do teor de água neste processo para obter-se uma densidade adequada na compactação da mistura, pois todos solo, ao ser compactado, necessita desta umidade para atingir uma densidade máxima, quando ocorre a resistência dita mais estável do solo.

Segundo Ingles & Metcalf (1972) os resultados obtidos na estabilização química com o uso de água potável nas misturas solo-cal é satisfatório. A vantagem da utilização de água do abastecimento público, nos ensaios em laboratório, é que representa melhor as condições encontradas em campo.

2.3.2 Dosagem

Segundo Oliveira (2010) vários tipos de dosagens para misturas solo-cal foram testados por muitos pesquisadores. As conclusões, positivas ou negativas, a respeitos desses métodos podem estar relacionadas ao tipo de solo e cal utilizada, bem como à maneira de execução de cada ensaio.

Lovato (2004) testou dois tipos de cal (cálcica e dolomítica) em um solo laterítico por dois métodos de dosagem: o método do pH de Eades e Grim e o método de Thompson. Obteve melhores resultados com a cal cálcica e o mesmo percentual de cal através dos dois métodos.

Proposto por Eades e Grim (1966) *apud* Corrêa (2008), o método do pH fundamenta-se no pH da mistura solo-cal. O princípio básico deste procedimento é adicionar suficiente quantidade de cal de modo a assegurar um pH de 12,4 para a ocorrência das reações pozolânicas (efeito cimentante que gera maior capacidade de suporte).

O procedimento consiste basicamente das seguintes etapas:

a) Colocam-se no interior de recipientes plásticos com tampas de rosca, amostras de solo seco ao ar, passando na peneira 40. A quantidade de solo deve ser tal a garantir um peso de solo seco de 20 gf;

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

b) Usar pelo menos cinco recipientes, adicionando ao solo seco, teores de cal de 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Misturar solo seco e cal;
c) Acrescentar 100 ml de água destilada às misturas de solo-cal;
d) Agitar as misturas, pelo menos durante 30 segundos, até completa homogeneização;
e) Agitar as garrafas por um período de 30 segundos, a cada 10 minutos;
f) Após uma hora transferir a "lama" a um recipiente de plástico aberto e determinar o pH. O potenciômetro (medidor de pH) deve ser calibrado com uma solução de pH igual a 12;
g) Registrar o pH de cada mistura solo-cal. O menor teor que conduz a um pH de 12,4 é o teor necessário para estabilizar o solo, ou seja, na mistura há cal suficiente para toda a fase rápida e para dar início às reações pozolânicas, as quais consomem mais cal.

A dosagem visa quantificar a porcentagem de cal a ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência e a durabilidade adequadas ao uso que a mistura solo-cal se destina. Este procedimento é realizado através de baterias de testes em laboratório (INGLES & METCALF, 1972).

2.4 Comportamento da mistura Solo-Cal

Segundo Dalla Rosa (2009) as reações que ocorrem em sistemas constituídos de materiais como solo, cal e água são relativamente complexas. Uma ideia geral do fenômeno físico-químico envolvido é que quando a cal é misturada ao solo, parte desta cal combina-se com as partículas de solo e uma segunda parte, com o dióxido de carbono presente nas fases ar e água do solo (MATEOS, 1961 *apud* DALLA ROSA, 2009).

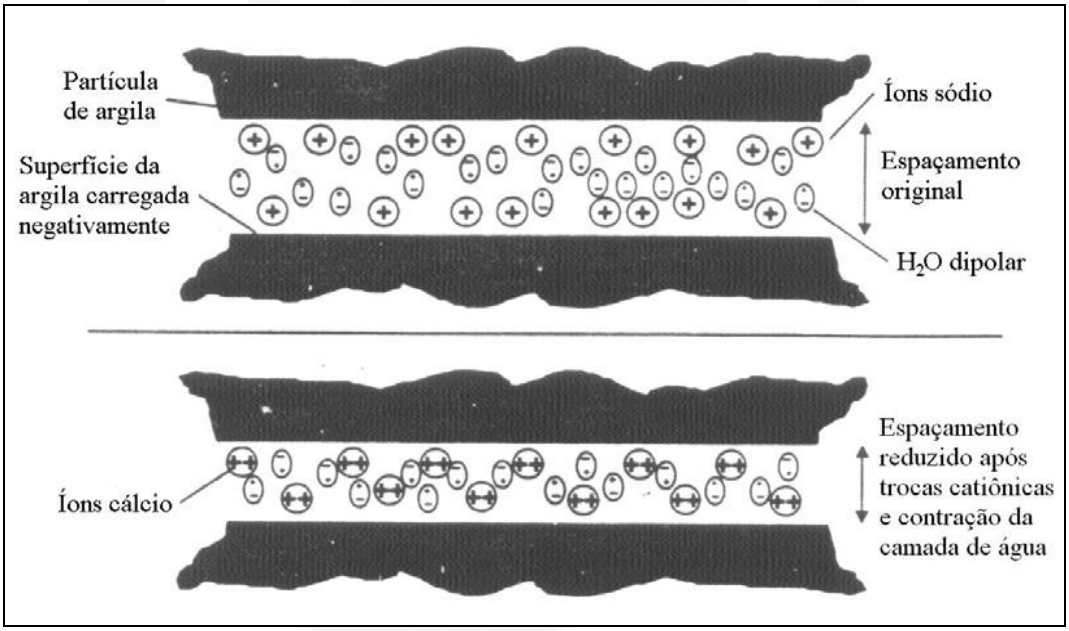
Algumas das principais propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonos e/ou sulfato, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos (LOVATO, 2004).

A estabilização química com a utilização de cal é caracterizada por duas fases: a fase inicial rápida (que dura de horas a dias) e a fase lenta (que pode levar meses ou anos). Na fase rápida estão as reações da troca catiônica e floculação. A fase lenta é caracterizada pelas reações cimentantes pozolânicas que proporcionam aumento da resistência, e pela carbonatação (CORRÊA, 2008).

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Hooper (1961) *apud* Azevêdo (2010) destaca que, quimicamente, ocorre uma troca de base e os cátions derivados da cal, de carga mais forte, substituem os íons de carga mais fraca, como os do sódio, magnésio e hidrogênio, existentes na superfície da argila (Figura 2). As partículas do solo também são dotadas de cargas elétricas em suas superfícies e a ligação entre essas partículas depende da carga e do tamanho dos íons presentes neste contato. Quando substituídos pelo íon Ca + ou Mg +, estas partículas assumem uma condição favorável à floculação, devido à uma atração de maior magnitude. Pode-se então considerar que o efeito físico desta floculação entre partículas de argila e cal seja semelhante a um aumento de diâmetro das partículas, com o consequente acréscimo de resistência por atrito entre elas (AZEVÊDO, 2010).

Figura 2 – Mecanismo de troca de cátions

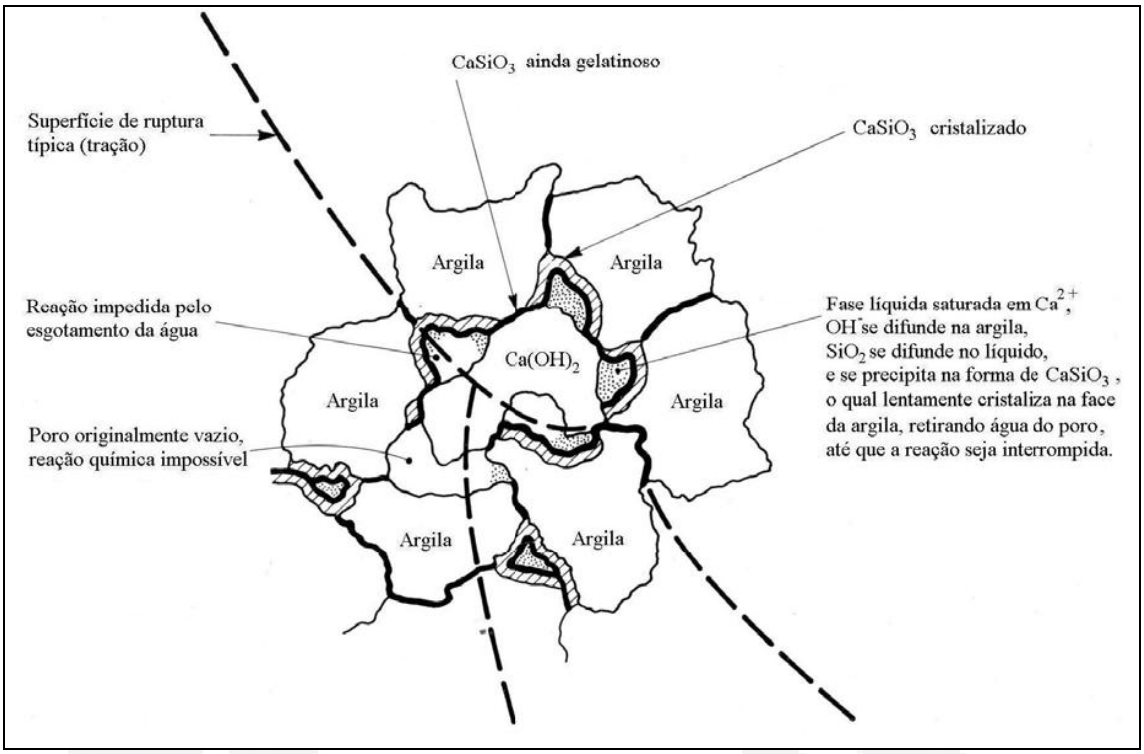


Fonte: Prusinski e Bhattacharja (1999) *apud* Lovato (2004, p. 12)

A cimentação pozolânica do solo deve-se à reação química entre cal, a água e os elementos pozolânicos do solo (encontrados na maioria dos solos com teor de argila), originando compostos de silicatos e alumínios hidratados, semelhantes ao produto obtido pela hidratação do cimento Portland. Este efeito cimentante gera um aumento da capacidade de suporte do solo, pois conforme mostrado na Figura 3, as partículas de solo floculadas após o contato com a cal têm a tendência de formar os compostos citados (AZEVÊDO, 2010).

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 3 – Mecanismo de estabilização solo-cal



Fonte: Adaptado de Ingles & Metcalf (1972, p. 138)

Segunda Azevêdo (2010), a carbonatação, conhecida como o ciclo da cal, é o retorno da cal hidratada à condição de carbonato de cálcio, o qual ocorre com a presença de CO2. Este agente cimentante formado é relativamente é fraco, razão pela qual o efeito da carbonatação não é desejável no processo.

2.4.1 Variáveis

Quando se adiciona cal a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas. Essas alterações dependem de diversos fatores, entre eles: tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura.

Nos próximos itens serão detalhados os efeitos de alguns dos fatores considerados de grande importância na determinação da resistência do solo-cal e que tem relação com as variáveis de estudo escolhidas nesta pesquisa.

2.4.1.1 Efeito da Cal

A adição de pequenas quantidades de cal modificará as propriedades do solo, enquanto que maiores quantidades irão alterar suas propriedades. A primeira resposta da mistura solo-

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria da trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES & METCALF, 1972).

Guimarães (2002) afirma que, de modo geral, a cal sempre afeta positivamente certas propriedades do solo, como as seguintes características físicas: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

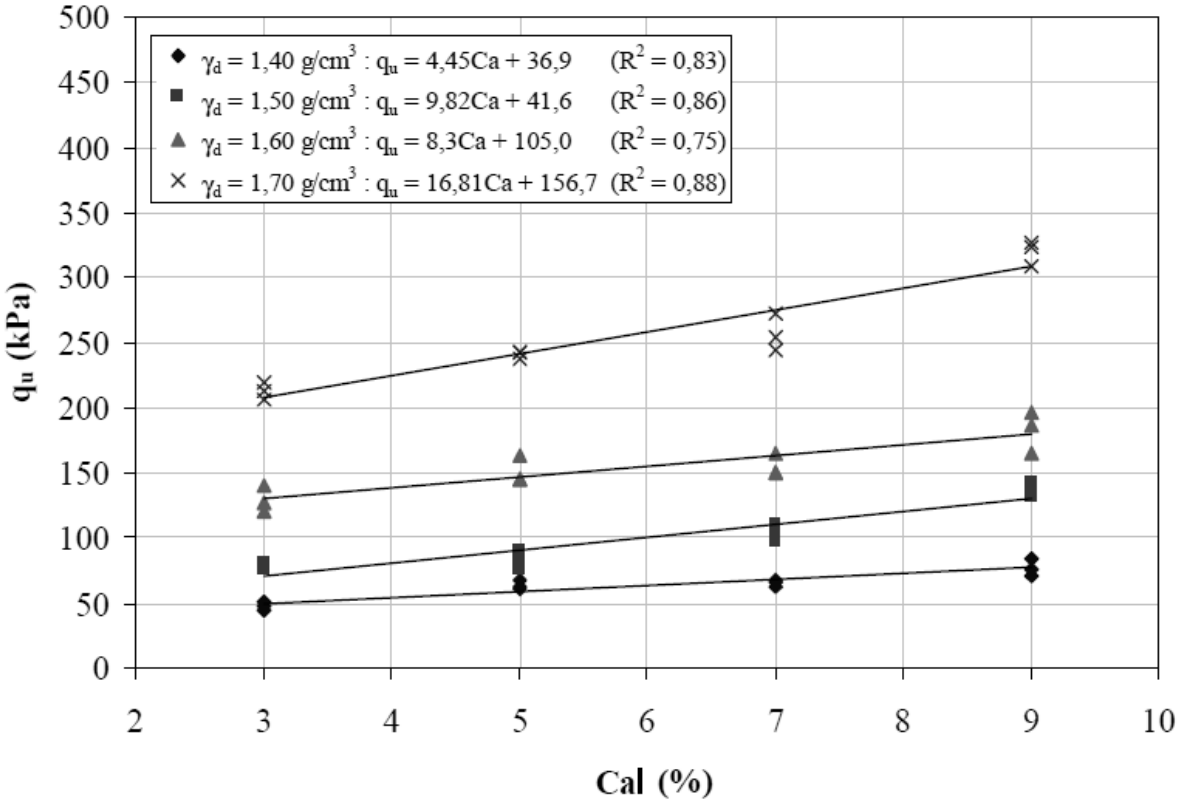
A compactação de uma mistura solo-cal geralmente produz uma resultante de massa específica aparente menor, até 5%, do que o correspondente do solo original, devido a ação da cal nas alterações texturais da mistura. O aumento de retenção da água, da granulometria e do teor ótimo de umidade facilitam a secagem dos solos, o que agiliza os trabalhos de construção de pavimentos com aplicações iniciais de cal (GUIMARÃES, 2002).

Segundo Dalla Rosa (2009) a resistência à compressão simples de uma mistura solo-cal aumenta linearmente como o aumento da quantidade de cal. Defende ainda que pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência e, se aumentada a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples cresce em média 55%.

A Figura 4 apresenta a variação da resistência à compressão simples em função da quantidade de cal e tempo de cura de noventa dias.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples



Fonte: Dalla Rosa (2009, p. 80)

2.4.1.2 Efeito da densidade e compactação

A densidade na qual a mistura é compactada é de similar importância à quantidade de cal. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES & METCALF, 1972).

Segundo Lovato (2004) diversos autores observam que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente máximo que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o peso específico aparente máximo (γ_d) continua diminuindo.

As partículas do solo se tornam mais floculadas quando adicionada a cal devido a substituição dos íons de sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à esta floculação, a quantidade e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o γ_d do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998 *apud* BUENO, 2011).

2.4.1.3 Efeito do teor de umidade

Guimarães (2002) descreve que o tipo de cal utilizada no processo de estabilização influencia no teor de umidade ótimo. Descreve que, para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cales cálcica e dolomítica, houve uma variação 1,3% maior para as misturas com a cal cálcica.

Solos estabilizados com cal normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção de uma massa específica aparente seca máxima, conforme determinado nos ensaios em laboratório. Porém, estudos com solo-cal determinam que em alguns casos o teor de umidade que apresenta máxima resistência e durabilidade não é igual ao teor de umidade que gera maior γ_d, e sim um valor um pouco inferior ao teor ótimo (CARRARO, 1997 *apud* BUENO, 2011).

> Osinubi (1998) *apud* Bueno (2011, p. 51) estudou a influência do retardamento na compactação em misturas solo-cal, observando uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e à floculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactos imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo: quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem ás partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que não pode recuperar sua total resistência.

Em misturas solo-cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para as trocas catiônicas onde ocorrem as reações químicas, e que o teor de umidade ótimo obtido em laboratório é suficiente para efetivar esse processo.

2.4.2 Comportamento

Segundo Dalla Rosa (2009) solos estabilizados quimicamente, mediante a adição de cal, dão origem a um novo material geotécnico artificialmente cimentado. Sendo o processo de estabilização executado corretamente, o comportamento mecânico deste novo material, entre outras características, pode ser significativamente diferente daquele que caracteriza o solo natural utilizado, não cimentado.

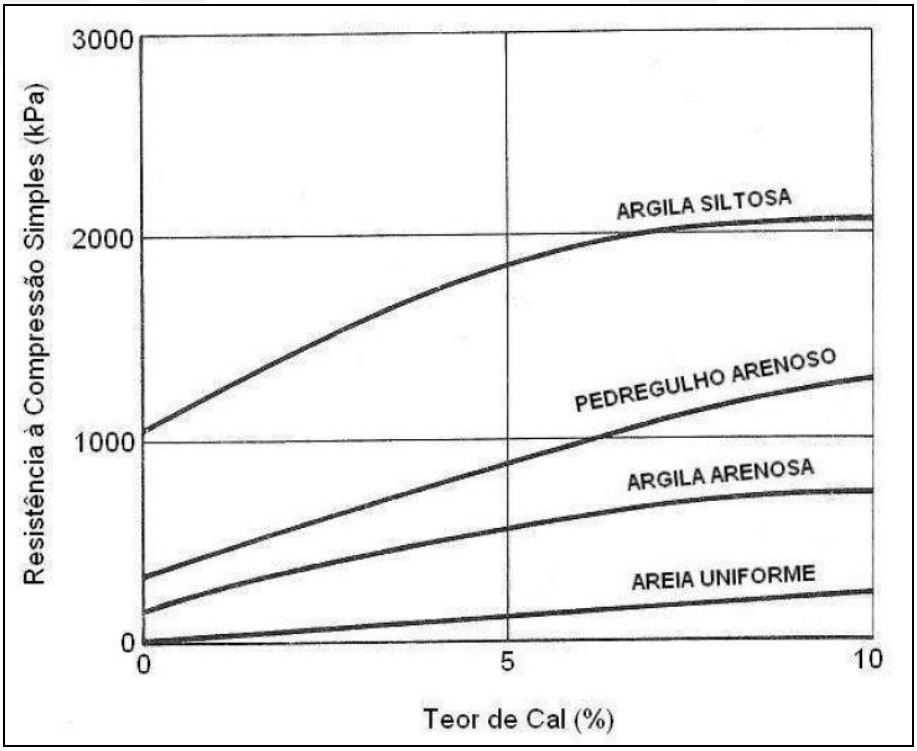
BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

José Filho (2002) analisou o comportamento dos solos utilizados na construção de trechos experimentais com a adição de cal, sendo essa análise somente aos ensaios de limites de consistência e resistência à compressão simples para teores de cal de 3, 5, 7% e com tempos de cura de 7, 28, 63 dias para as três energias, normal, intermediária e modificada. Com a análise dos resultados, concluiu que os valores da resistência da mistura solo-cal cresceram mais com a influência da energia de compactação do que com o aumento do teor de cal, para os limites de consistência, com a adição da cal, o índice de plasticidade diminui, melhorando a trabalhabilidade.

2.4.2.1 Resistência à compressão simples

Segundo Ingles & Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certa proporção. A partir deste ponto a o acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido à cimentação lenta característica da mistura solo-cal.

Figura 5 – Efeito da porcentagem de cal em amostras com sete dias de cura



Fonte: Adaptado de Ingles & Metcalf (1972, p.130)

Conforme mostrado na Figura 5, o efeito da quantidade de cal dependerá do tipo de solo tratado.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental para verificação do comportamento do solo com adição de cal foi dividido e executado em quatro etapas. Em um primeiro momento foram coletadas as amostras de solo e realizados ensaios de caracterização deste solo natural e da cal com o objetivo de classificar os materiais e conhecer suas propriedades necessárias para as etapas posteriores.

Na segunda etapa foram definidos os teores de cal, teor de umidade e pesos específicos para a posterior moldagem dos corpos de prova.

Na terceira etapa foi realizada a moldagem dos corpos de prova de acordo com a NBR 6457/1986[9] e seguindo os procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após concluído o tempo de cura pré-determinado, foi executada a quarta etapa que consiste na realização de ensaios de compressão simples. Esta etapa objetiva avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis estudadas sobre a resistência mecânica da mistura solo-cal.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização da pesquisa são descritos a seguir.

3.1.1 Solo

O solo utilizado, conforme mostrado na Figura 6, é um solo residual de basalto pertencente à Formação Serra Geral, em uma provável área de contato com o arenito da Formação Botucatu. Possui cor avermelhada e estrutura argilosa, provenientes de alterações do basalto e dos solos característicos da região.

Este tipo de solo foi escolhido, pois é o solo predominante na região de realização da pesquisa e abrange extensa área do território do Rio Grande do Sul. Também foi considerada a uniformidade de suas características físicas e boa trabalhabilidade em laboratório.

[9] ABNT NBR 6457/86: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Figura 6 – Amostra de solo

3.1.2 Cal

A cal utilizada foi do tipo Hidratada CH-II, da marca Dagoberto Barcellos, comercialmente chamada de “Primor Extra”. De acordo com o fabricante esta cal é produzida conforme a ABNT (2003) e atende a todas as exigências estabelecidas pela norma.

Foi adquirida em sacos de 20 kg e armazenada em sacos plásticos vedados, a fim de evitar sua hidratação prematura em função da umidade do ar.

3.1.3 Água

Foi utilizada água destilada para a realização dos ensaios, conforme especificado pelas normas.

3.2 Métodos

Os ensaios de caracterização física dos materiais foram realizados através de ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade e compactação.

Os métodos utilizados na pesquisa são detalhados a seguir.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

3.2.1 Coleta do solo a ser estudado

O solo analisado foi coletado no dia 25 de abril de 2013. A jazida, de onde foram coletadas as amostras, localiza-se nos fundos do Prédio 17 do Centro Universitário UNIVATES, Bairro Universitário, município de Lajeado/RS, coordenadas 29°26'54.21"S e 51°56'40.35"O. A Figura 7 apresenta o local de coleta do material analisado.

Figura 7 – Local da coleta da amostra de solo

O material foi retirado no estado deformado, mediante escavação com ferramentas manuais, e acondicionado em embalagens plásticas, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. Durante a coleta e execução dos estudos, todos os cuidados foram tomados para se evitar a contaminação da amostra, principalmente por matéria orgânica.

3.2.2 Estudo granulométrico

A análise granulométrica dos solos é a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como uma porcentagem do peso seco total. É um ensaio de caracterização rotineiro realizado por peneiramento, por sedimentação e difração a laser (CORRÊA, 2008).

Foi utilizado o método de difração a laser para análise granulométrica do solo e cal utilizada no estudo. Este consiste em dispersar as partículas num fluído em movimento

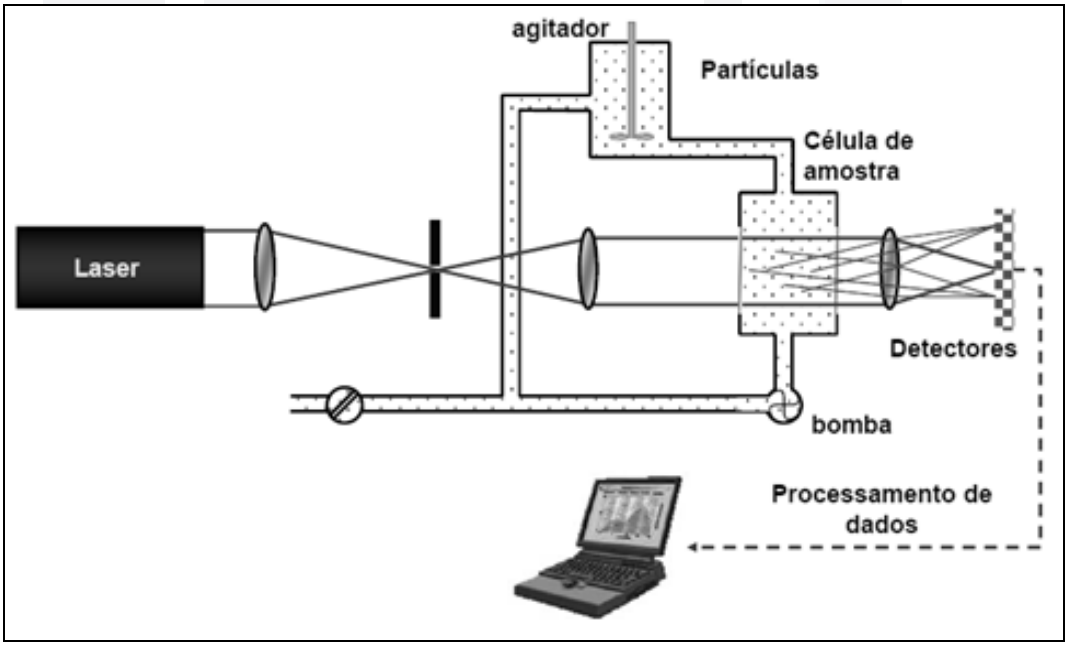
BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

causando descontinuidades no fluxo do fluído, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho de partícula. O princípio do método é que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação segundo quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz.

O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, pelo comprimento de onda da luz, e pelo tamanho e formato da partícula. Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula através softwares matemáticos (ALVES, 2011).

A Figura 8 mostra o princípio de funcionamento de um instrumento de difração a laser.

Figura 8 – Instrumento de difração a laser



Fonte: Alves (2011, p. 22)

3.2.3 Limites de consistência

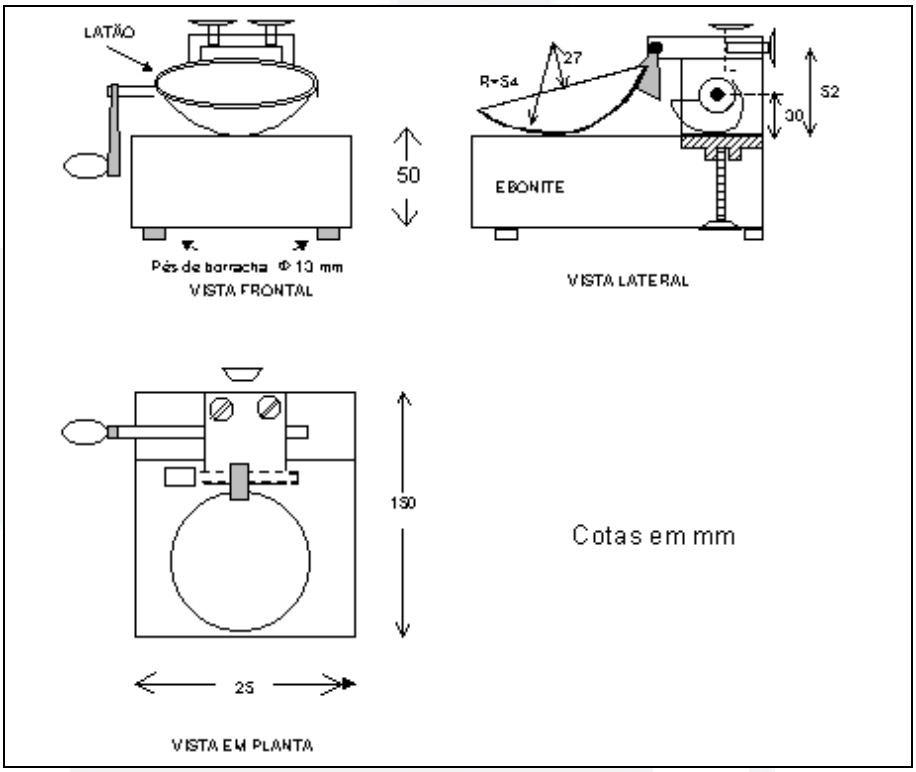
O limite de liquidez corresponde ao teor de umidade de um solo quando são necessários 25 golpes no aparelho Casagrande (Figura 9) para fechar a ranhura-padrão, aberta na superfície da amostra.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Segundo Guimarães (2002) os limites de liquidez de mesma fração argilosa podem variar entre largas fronteiras, como por exemplo, no caso de solos com caolinita, onde ocorrem variações de até 100%. Afirma ainda, que a adição de cal ao solo eleva o limite de liquidez.

O ensaio para determinação do limite de liquidez do solo foi executado conforme a NBR 6459/1984[10].

Figura 9 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Fiori (2009, p. 48)

O limite de plasticidade é determinado pela porcentagem de umidade para a qual o solo começa a se fraturar ao se tentar modelar um cilindro de 3 mm de diâmetro e com cerca de 10 cm de comprimento (FIORI, 2009). "A adição de cal em argilas com ou sem cátions trocáveis aumenta o índice de plasticidade, tornando o solo portador de minerais com esse predicado mais facilmente adaptado a trabalhos e construções, pelo efeito aglomerante da troca iônica" (GUIMARÃES, 2002).

O procedimento foi executado manualmente e atendeu às normas descritas na NBR 7180/1984[11].

[10] ABNT NBR 6459/84: Solo - Determinação do limite de liquidez.
[11] ABNT NBR 7180/84: Solo - Determinação do milite de plasticidade.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

3.2.4 Compactação

A ausência de vazios no solo aumenta a resistência do mesmo, pois quando estes são removidos do solo, ocorre maior contato entre os grãos. Quando do o material encontra-se desta forma, é denominado solo compactado, e a técnica de compactação pode ser realizada no canteiro de obras por meio de equipamentos como rolo compactador, ou mesmo manualmente, dependendo da área de trabalho e do grau de compactação desejado. Este procedimento aumenta a densidade do solo, pois elimina os espaços ocupados pelo ar (CAPUTO, 2000).

O ensaio de compactação visa a densificação do solo e a obtenção do peso específico aparente seco ($\gamma_{dmáx}$) e da umidade ótima ($W_{ót}$) de um solo. Este procedimento foi adotado para determinar estas características nas amostras de solo natural e posterior comparação com o solo melhorado com cal.

Para a realização deste ensaio foram seguidas as normas descritas na NBR 7182/1986[12] e utilizada a energia de compactação normal.

Pesou-se uma amostra de 3000,10 g de solo seco ao ar e destorroado, ao qual foi adicionado 570g de água, correspondendo a 19% de umidade. O solo foi homogeneizado e o material foi despejado em um cilindro, com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura, até ocupar a terça parte de seu volume. O material foi compactado com um soquete metálico de massa 2,5 kg, efetuando-se 26 golpes. Em seguida, foi adicionado mais material para ocupar o segundo terço do recipiente e golpeou-se 26 vezes novamente. O restante do cilindro foi coberto com amostra até ser atingida uma altura superior a do anel complementar e procederam-se mais 26 golpes com o soquete metálico. O anel complementar do cilindro foi removido, retirando-se o excesso de solo com a utilização de uma espátula metálica. Este corpo de prova foi pesado e calculou-se o peso específico úmido da amostra utilizando-se a relação com o volume total do cilindro.

Este procedimento foi realizado com teores de umidade diferentes, partindo-se de 19%, de forma a obter-se a curva de compactação do material utilizado que expressa a umidade ótima e o grau de compactação ideal.

O teor de umidade pode ser definido como a “relação entre a massa de água presente em certo volume de solo e a massa das partículas sólidas, no mesmo volume, expressa em

[12] ABNT NBR 7182/86: Solo - Ensaio de compactação.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

porcentagem". A determinação do teor de umidade foi realizada de acordo com a norma NBR 6457/1986[13].

Durante os processos de caracterização do solo e moldagem dos primeiros corpos de prova foram retiradas amostras, as quais foram pesadas e levadas à estufa a 110 ºC por 18 horas. O conjunto foi pesado imediatamente após a retirada da estufa, de forma a evitar a absorção de umidade pela amostra. A amostra foi novamente levada por mais 2 horas à estufa, pesando-se novamente após esse período para certificação de que o peso não foi alterado, garantindo, assim, a evaporação de toda umidade contida na amostra.

Para a determinação do teor de umidade, foi utilizada a Equação 1:

$$h = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} . 100 \qquad (1)$$

Onde:

h – teor de umidade, %;

m_{bu} – massa bruta úmida, correspondente à massa do recipiente mais a massa do material úmido, g;

m_{bs} - massa bruta seca, correspondente à massa do recipiente mais a massa do material seco, g;

m – massa do recipiente, g.

Os teores de umidade utilizados nos ensaios tiveram como base os resultados obtidos no ensaio de compactação. Após a análise das primeiras amostras utilizadas na moldagem dos corpos de prova, concluiu-se que o processo de pesagem e mistura dos materiais estava sendo executado de maneira correta, não sendo realizada a determinação do teor de umidade para os demais CP's.

3.2.5 Determinação do teor de cal

A quantidade de cal a ser utilizada na mistura solo-cal foi determinada através da medida de pH das amostras, pelo método de Eades e Grim.

O procedimento foi realizado nas seguintes etapas:

a) Foi colocado no interior de recipientes plásticos com tampas de rosca, amostras de solo seco ao ar, passadas na peneira 40. As amostras de solo foram pesadas em porções de solo seco com aproximado 20 g;

[13] ABNT NBR 6457/86: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

b) Usou-se pelo menos cinco recipientes, adicionando ao solo seco teores de cal de 1%, 2%, 3%, 4% , 5%, 6%, 7%, 8% e 9%. Misturou-se solo seco e cal;
c) Foi acrescentado 100 ml de água destilada às misturas de solo-cal;
d) As misturas foram agitadas por 30 segundos, até completa homogeneização;
e) Agitou-se as garrafas por um período de 30 segundos, a cada 10 minutos;
f) Após uma hora transferiu-se a "lama" a um recipiente de plástico aberto e determinou-se o pH com potenciômetro (medidor de pH), que foi calibrado com uma solução de pH igual a 12;
g) Registrou-se o pH de cada mistura solo-cal.

Devido as características do solo utilizado não chegou-se ao pH limite descrito pelo método, então foram consideradas as porcentagens de cal onde o solo apresentou pH superior a 10.

3.2.6 Moldagem dos corpos de prova (CP)

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, em triplicata para cada teor de cal, devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples, obtendo-se assim uma maior confiabilidade. O processo de moldagem de cada CP se deu através das etapas de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

A quantidade do agente estabilizante necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa do solo seco utilizada. O teor de umidade foi definido pela curva de compactação do material, onde se encontra a umidade ótima.

Os materiais (solo, cal e água) foram pesados com tolerância de 0,5 gramas e misturados até sua completa homogeneização. Na sequência a mistura solo-cal-água foi pesada novamente a fim de separar a quantidade necessária para moldagem dos CPs. As três camadas utilizadas na compactação foram pesadas e colocadas em sacos plásticos fechados para evitar a perda de umidade.

O molde foi lubrificado com óleo a fim de facilitar a desmoldagem e a mistura foi compactada estaticamente com uma prensa em três camadas, de maneira que cada camada atingisse o peso específico aparente seco definido. Após a execução da primeira e da segunda camada forma feitas ranhuras para proporcionar uma melhor adesão entre as mesmas.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Após o processo de compactação, os CPs foram extraídos do molde, pesados com uma tolerância de 0,5 gramas e tiveram sua altura e diâmetro medidos com um paquímetro (Figura 10).

Figura 10 – Corpo de prova moldado para a realização de ensaios de compressão

Os corpos de prova foram, então, acondicionados em sacos plásticos devidamente fechados e identificados, como indicado na Figura 11.

Figura 11 – Corpos de prova ensacados para evitar perda de umidade

Foram considerados os corpos de prova que atenderam as seguintes condições:

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

a) Grau de compactação de 99 a 101% de especificado;
b) Teor de umidade de ± 0,5% do teor de umidade especificado;
c) Diâmetro especificado ± 0,5 mm;
d) Altura especificada ± 1 mm.

3.2.7 Tempo de cura

A cura dos corpos-de-prova foi realizada à temperatura ambiente no Laboratório de Solos e Betumes do Centro Universitário Univates e teve duração de 28 dias, tempo este necessário para que ocorram todas as reações físico-químicas envolvidas no processo. No vigésimo sétimo dia os CPs foram imersos em água com objetivo de aproximar à condição de saturação e consequentemente reduzir os valores de sucção matricial, a qual influência nos resultados dos testes de compressão simples.

3.2.8 Ensaio de resistência à compressão simples

Segundo Bueno (2011) "ensaios de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal".

O ensaio de compressão simples constitui a principal etapa deste trabalho e objetiva avaliar as influências das variáveis aplicadas sobre a resistência da amostra de solo estudada. Os procedimentos foram executados segundo a norma DNER 180/1990[14].

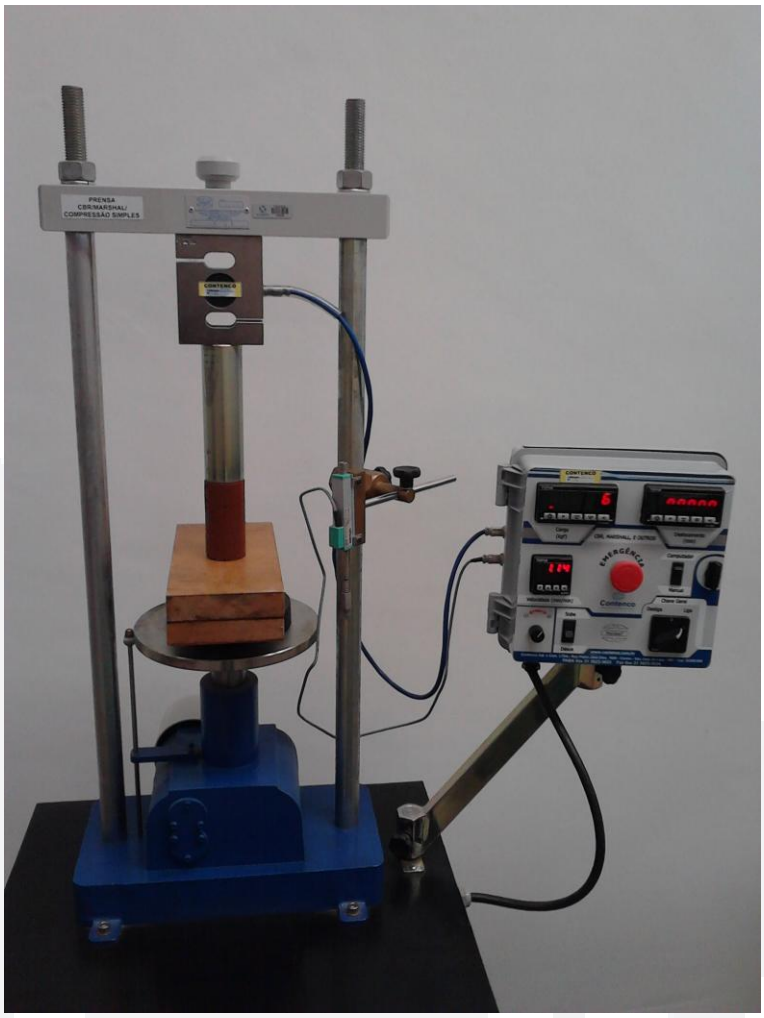
Os corpos de prova, após cura por 28 dias a temperatura ambiente, foram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os CPs eram retirados do tanque e superficialmente secos com o auxílio de papel absorvente. Procedeu-se então a execução do ensaio e anotando-se a carga máxima atingida.

Foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 5 Toneladas-Força (Tf) (Figura 12), os CPs foram comprimidos até ocorrer o seu rompimento. A relação entre a carga de ruptura e a área média do cilindro é chamada de "resistência à compressão simples". A velocidade de deformação aplicada foi de 1,14 mm por minuto.

[14] DNER-ME 180/90: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à compressão simples.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 12 – Prensa para ensaio de compressão simples



Conforme descrito na NBR 12253/1992[15], para critério de aceitação do ensaio de resistência a compressão simples foi definido que a resistência dos corpos de prova moldados com as mesmas características (γ_d, w e teor de cal), não deveria desviar mais de 10% da média do conjunto de CPs. Os ensaios que não atenderam este critério foram desconsiderados.

[15] ABNT NBR 12253/92: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

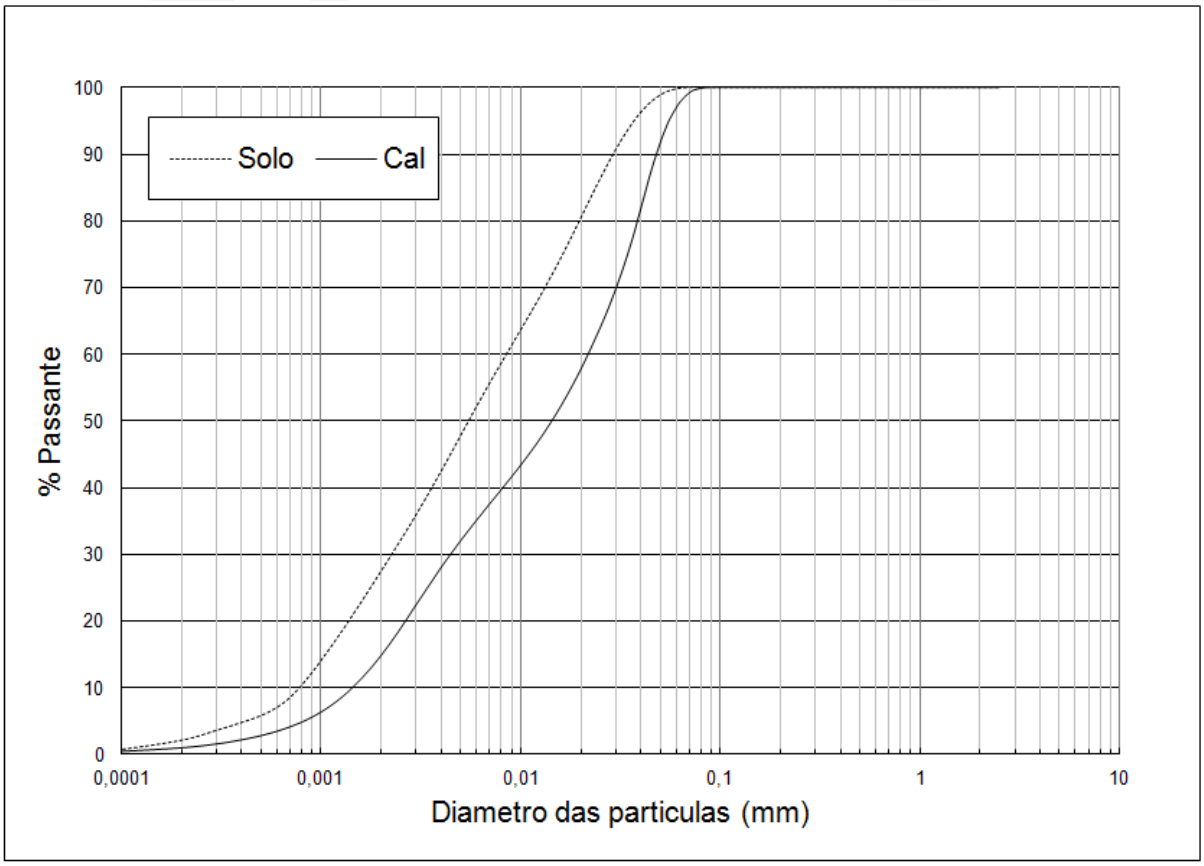
4 RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados a seguir.

4.1 Caracterização Geotécnica Básica

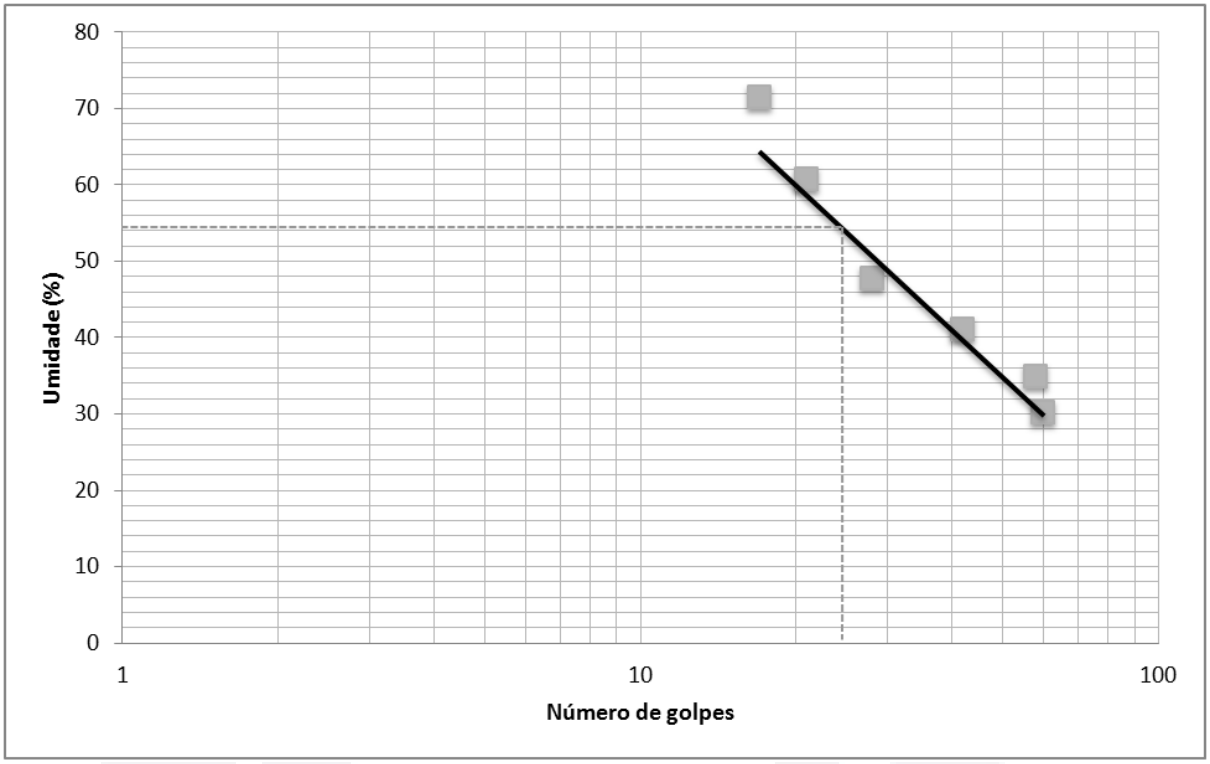
A Figura 13 apresenta a curva granulométrica da cal e do solo utilizados nos ensaios. O solo é composto por 27,53% de argila, 72,01% de silte e 0,46% de areia fina.

Figura 13 – Gráfico de distribuição granulométrica



A Figura 14 mostra o gráfico do ensaio para a determinação do limite de liquidez do solo. Pode-se observar que o teor de umidade do solo necessário para fechar a ranhura-padrão com 25 golpes equivale a 54,5%.

Figura 14 – Gráfico do ensaio para determinação do limite de liquidez



Na Tabela 2 apresentam-se os valores obtidos no ensaio para determinação do limite de plasticidade. Observa-se que o solo utilizado apresentou um limite de plasticidade igual a 40,02%.

Tabela 2 – Valores obtidos no ensaio para determinação do Limite de Plasticidade

Amostra	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	***Média (%)***
Umidade (%)	39,1	40	38,9	38,7	41,7	41,7	**40,02**

A partir da análise da curva granulométrica (Figura 13) e dos limites de consistência obtidos (Figura 14 e Tabela 2) percebe-se que 100% do material passa na peneira 200, e que este apresenta uma fração maior de silte na sua composição. O limite de liquidez (40,02%) é baixo, considerando a média apresentada pelas argilas.

O índice de plasticidade, que é a diferença entre o LL e LP, equivalente a 14,48%, indica um solo medianamente plástico (7<Índice de Plasticidade<15). Portanto, o solo utilizado na pesquisa, de acordo com o SUCS[16], é classificado como solo siltoso - silte elástico.

[16] SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

4.2 Teor de umidade e compactação

Os resultados do ensaio de compactação estão apresentados na Tabela 3. Observa-se que os valores do peso de solo da amostra cresceram até uma umidade de 29%. A amostra com 34% de umidade apresentou diminuição do peso de solo, o que significa que a compactação máxima se encontra no intervalo entre 29% e 34%.

Tabela 3 – Determinação do peso de solo e de água nas amostras com diferentes teores de umidade

Amostra	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Umidade (%)	19	24	29	34	39	44
M + S + A (g)	5479,47	6157,00	6350,00	6460,00	5806,04	5758,60
Molde (g)	4174,90	4600,00	4600,00	4600,00	4147,90	4147,90
S + A (g)	1304,57	1557,00	1750,00	1860,00	1631,50	1583,70
Água (g)	247,84	373,68	507,50	632,40	636,29	696,83
Solo (g)	1056,70	1183,32	1242,50	1227,60	995,22	886,87

Foi obtido o peso específico aparente seco das amostras para a determinação da umidade ótima. A Tabela 4 apresenta a relação entre a umidade e o peso específico aparente seco das amostras.

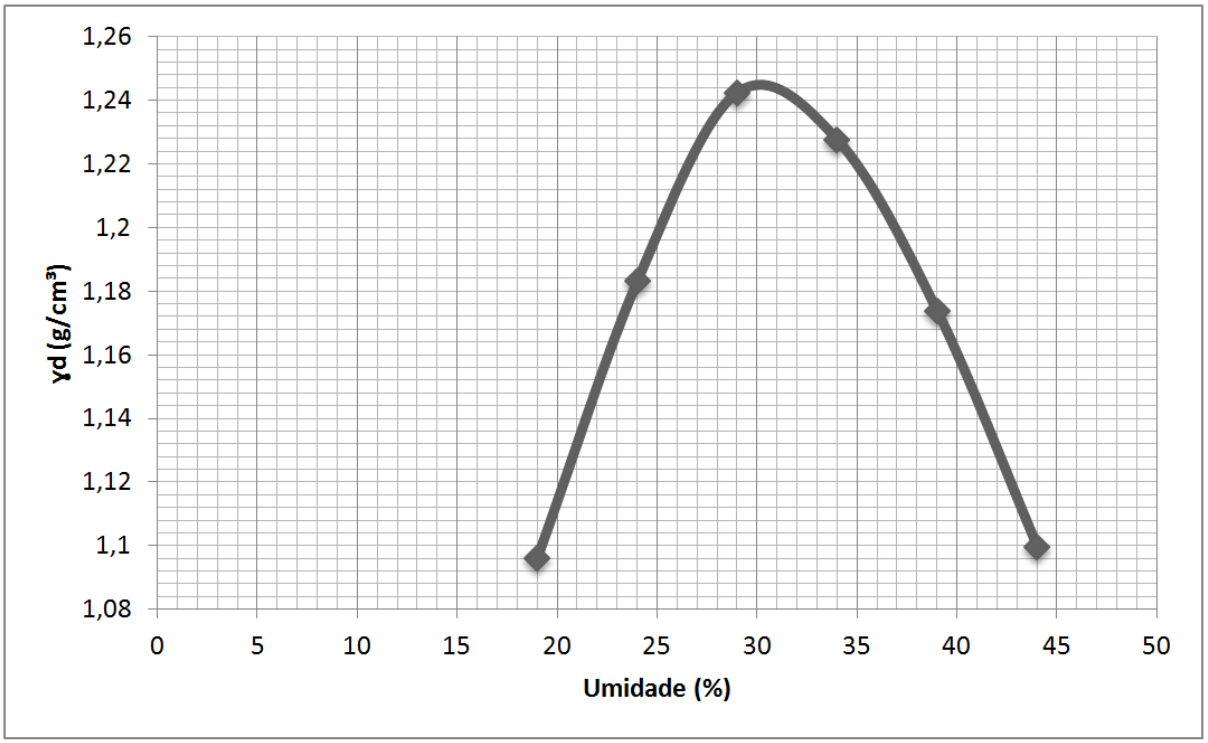
Tabela 4 – Relação teor de umidade x peso específico seco das amostras

Amostra	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Umidade (%)	19	24	29	34	39	44
γd (g/cm³)	1,096	1,183	1,242	1,227	1,173	1,099

Obteve-se, assim, a curva de compactação através da relação entre o teor de umidade e o peso específico aparente seco das amostras, conforme apresentado na Figura 15.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 15 – Gráfico da relação teor de umidade x peso específico aparente seco



A partir da curva de compactação gerada, determinou-se a umidade ótima, que é aquela que apresenta a maior densificação da amostra analisada. Na Figura 15 é possível observar que o teor de umidade ótima foi de 30% e o peso específico aparente seco de 1,2424 g/cm³.

4.3 Teor de cal

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos através do método Eades e Grim.

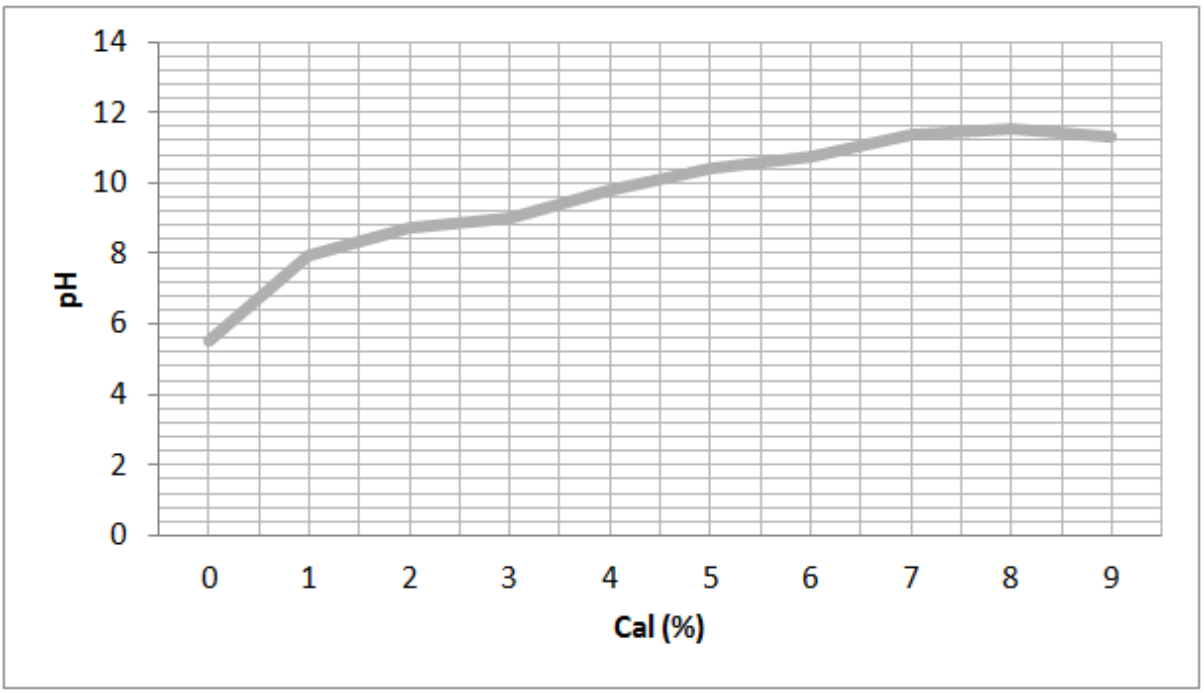
Tabela 5 – Determinação do pH das amostras com adição de cal

% CAL	*0*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
pH	5,54	7,91	8,75	9,00	9,79	10,42	10,77	11,36	11,52	11,30

Na Figura 16, é possível verificar que a medida do pH do solo natural foi levemente ácido, com pH igual a 5,54. Com a adição de 1% de cal, a amostra passou para um pH levemente alcalino. Entre as porcentagens de 2% a 4%, houve um incremento no pH medido. As amostras com 5% e 6% apresentaram pH em torno de 10. A partir de 7% de cal na mistura, houve uma estabilização na medição, ficando o pH em torno de 11,3 a 11,5.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 16 – Gráfico da relação teor de cal x pH



Devido as características do solo utilizado não chegou-se ao pH limite descrito pelo método, então foram consideradas as porcentagens de cal onde o solo apresentou pH superior a 10. A partir dos resultados obtidos foram determinas as porcentagens de 5%, 7%, 9%, 11% a serem utilizadas como parâmetros.

4.4 Ensaios de resistência à compressão simples

Os resultados dos corpos de prova ensaiados à compressão simples são expressos nas tabelas a seguir. Pode-se observar que os dados estão agrupados a cada três linhas, pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Tabela 6 – Especificações dos corpos de prova moldados com γ_d = 1,2424 e W = 30%, após 28 dias de cura

CP	MOLD.	ROMP.	CAL (%)	PESO (g)	H (cm)	D (cm)	W (%)	Yd (g/cm³)	FORÇA (kgf)	TENSÃO (kPa)	MÉDIA (kPa)
16	13/set	11/out	5	318,30	10,00	5,00	30	1,2476	21	104,94	
17	13/set	11/out	5	321,50	10,02	5,02	30	1,2477	21	104,11	
18	13/set	11/out	5	320,40	10,02	5,01	30	1,2483	20	99,55	102,86
19*	13/set	11/out	7	318,07	10,00	5,00	30	1,2467	22	109,94	
20	13/set	11/out	7	320,50	10,00	5,01	30	1,2512	26	129,41	
21	13/set	11/out	7	319,90	9,99	5,00	30	1,2552	27	134,92	132,17
22	13/set	11/out	9	318,10	10,01	4,99	30	1,2506	29	145,50	
23	13/set	11/out	9	320,10	9,98	5,02	30	1,2472	30	148,72	
24	13/set	11/out	9	318,40	10,02	5,00	30	1,2455	29	144,92	146,38
25	13/set	11/out	11	318,20	10,00	5,00	30	1,2472	33	164,91	
26	13/set	11/out	11	317,90	10,00	5,01	30	1,2411	33	164,25	
27	13/set	11/out	11	320,70	9,99	5,01	30	1,2533	36	179,18	169,45

* CP desconsiderado

Tabela 7 – Especificações dos corpos de prova moldados com γ_d = 1,30 e W = 30%, após 28 dias de cura

CP	MOLD.	ROMP.	CAL (%)	PESO (g)	H (cm)	D (cm)	W (%)	Yd (g/cm³)	FORÇA (kgf)	TENSÃO (kPa)	MÉDIA (kPa)
1	24/mai	21/jun	0	333,13	10,00	5,01	30	1,3005	26	129,41	
2	24/mai	21/jun	0	332,84	10,01	5,00	30	1,3033	25	124,93	
3	24/mai	21/jun	0	332,40	10,00	5,00	30	1,3029	22	109,94	121,43
4	24/mai	21/jun	5	333,35	10,00	5,00	30	1,3066	52	259,85	
5	24/mai	21/jun	5	334,33	10,02	5,00	30	1,3078	51	254,86	
6	24/mai	21/jun	5	335,04	10,02	5,01	30	1,3054	51	253,84	256,18
7	24/mai	21/jun	7	332,90	9,99	5,00	30	1,3062	53	264,85	
8	24/mai	21/jun	7	332,09	9,98	5,00	30	1,3043	58	289,84	
9	24/mai	21/jun	7	334,01	9,99	4,99	30	1,3158	56	280,97	278,55
10	24/mai	21/jun	9	331,97	10,01	5,00	30	1,2999	61	304,83	
11	24/mai	21/jun	9	331,85	10,00	5,00	30	1,3007	65	324,82	
12	24/mai	21/jun	9	334,02	10,02	5,00	30	1,3066	63	314,82	314,82
13	24/mai	21/jun	11	335,78	10,02	5,02	30	1,3031	68	337,11	
14	24/mai	21/jun	11	334,91	10,01	5,01	30	1,3062	71	353,39	
15	24/mai	21/jun	11	331,26	9,99	5,00	30	1,2997	74	369,79	353,43

* CP desconsiderado

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Tabela 8 – Especificações dos corpos de prova moldados com γ_d = 1,2424 e W = 35%, após 28 dias de cura

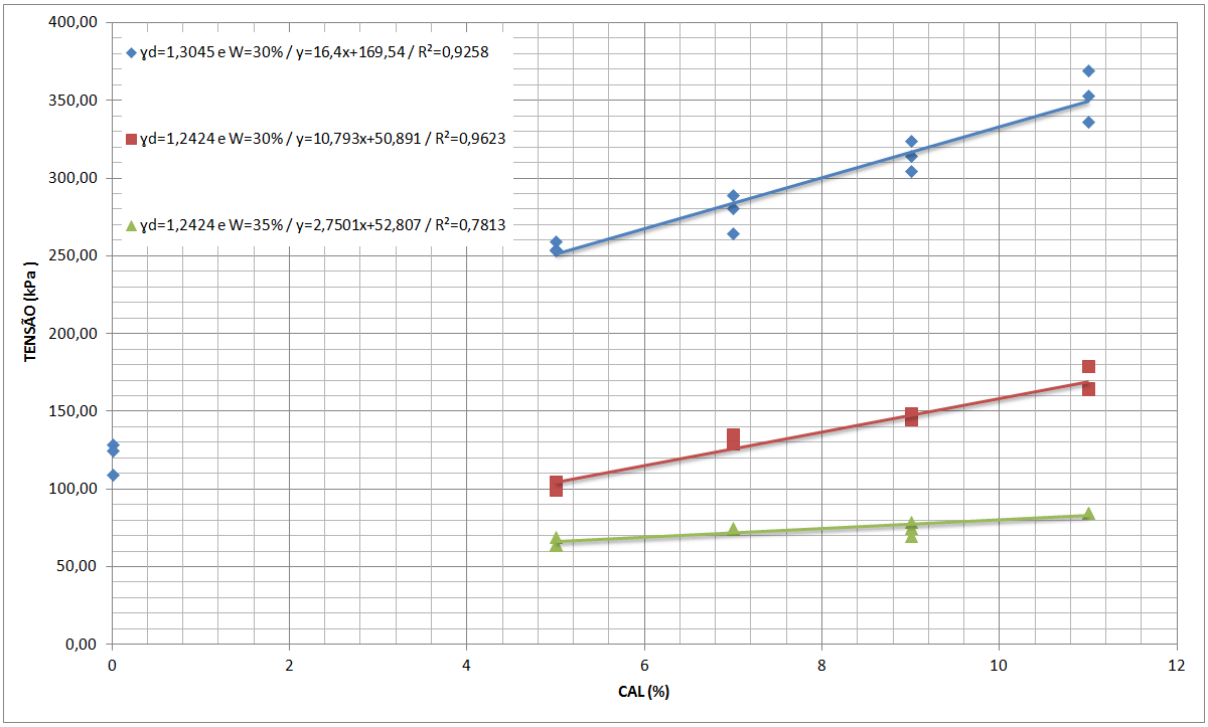
CP	MOLD.	ROMP.	CAL (%)	PESO (g)	H (cm)	D (cm)	W (%)	Yd (g/cm³)	FORÇA (kgf)	TENSÃO (kPa)	MÉDIA (kPa)
28	19/set	17/out	5	332,20	10,00	5,02	35	1,2439	14	69,40	
29	19/set	17/out	5	330,33	10,00	5,02	35	1,2369	13	64,45	
30	19/set	17/out	5	330,04	10,00	5,00	35	1,2457	13	64,96	66,27
31*	19/set	17/out	7	332,90	10,00	4,99	35	1,2616	13	65,22	
32	19/set	17/out	7	332,09	10,00	5,01	35	1,2485	15	74,66	
33	19/set	17/out	7	330,10	9,99	5,00	35	1,2472	15	74,96	74,81
34	19/set	17/out	9	331,97	10,01	5,02	35	1,2418	16	79,32	
35	19/set	17/out	9	331,85	10,00	5,00	35	1,2526	14	69,96	
36	19/set	17/out	9	332,02	10,00	5,00	35	1,2532	15	74,96	74,75
37*	19/set	17/out	11	331,43	10,02	5,00	35	1,2485	13	64,96	
38	19/set	17/out	11	331,91	10,01	5,00	35	1,2515	17	84,95	
39	19/set	17/out	11	331,26	10,00	5,00	35	1,2503	17	84,95	84,95

* CP desconsiderado

A variação da resistência à compressão simples de todas as amostras com a adição de cal, considerando dois diferentes pesos específicos aparentes secos (γ_d = 1,2424 e γ_d = 1,3045), dois teores de umidade (w = 30% e w = 35%) e tempo de cura de 28 dias, é apresentada na Figura 17.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 17 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão simples

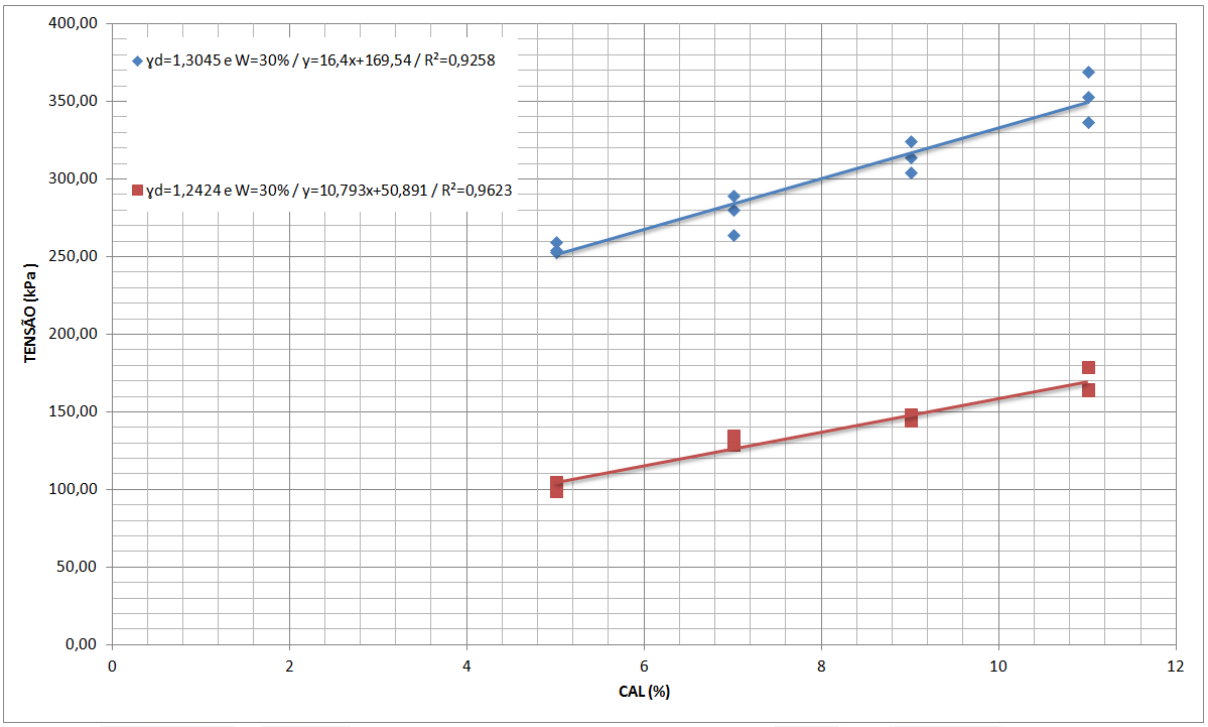


Na Figura 17 verifica-se que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal na mistura. Comprova-se, assim, que os produtos das reações entre solo, cal e água são os responsáveis pelo aumento da resistência das amostras estudadas.

Há um considerável aumento de resistência nas amostras moldadas com o γ_d 5% maior que o encontrado no ensaio de compactação. As amostras com 35% de umidade também obtiveram ganho de resistência com o aumento da porcentagem de cal, porém foram as que apresentaram menores números.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 18 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão em amostras com o mesmo teor de umidade

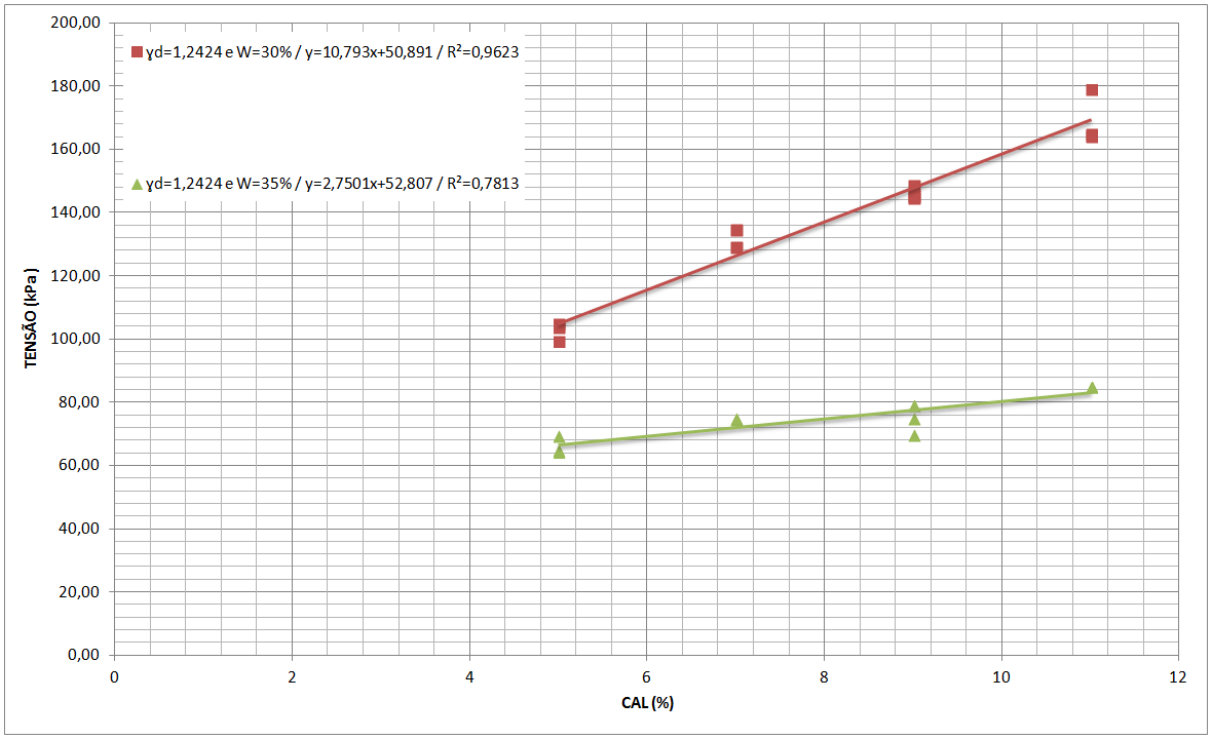


A Figura 18 apresenta a relação entre o teor de cal e a resistência à compressão simples em amostras com o mesmo teor de umidade, porém com peso específico seco diferente. Nota-se que há um aumento superior à 150% na resistência apresentada pelas amostras moldadas com um γ_d 5% maior. A variação da resistência com o aumento do teor de cal também foi superior nestas amostras (γ_d = 1,3045).

Dalla Rosa (2009), estudando a relação entre o teor de agente cimentante e a resistência à compressão simples, também relata que a taxa de aumento desta resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumenta com o aumento da massa específica aparente seca da mistura compactada. Destaca ainda, que esse fato indica que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactadas devido ao maior número de contatos entre as partículas.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

Figura 19 – Gráfico da relação teor de cal x resistência à compressão simples em amostras com o mesmo peso específico aparente seco



Na Figura 19 observa-se a relação entre o teor de cal e a resistência à compressão simples em amostras com o mesmo peso específico aparente seco, porém com umidade diferente. Têm-se um decréscimo na resistência, que varia entre 40% e 50%, com o aumento da umidade. Ocorre também nestas amostras (w=35%) uma menor variação do aumento da resistência com a adição de cal.

Foppa (2005) *apud* Rosa (2010) demonstrou que a resistência cresce até um determinado teor de umidade a partir do qual tende a decrescer. O decréscimo apresentado nesta pesquisa pode ser derivado do aumento do teor de umidade utilizado, englobando o w na faixa onde a resistência tende a ser menor. Ou ainda, pode ser derivado do tipo de solo estudado, visto que autor obteve seus resultados utilizando arenito.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental e da análise dos resultados foram estabelecidas as conclusões a seguir.

O principal objetivo desta pesquisa, ou seja, aprofundar os conhecimentos sobre o método de estabilização de solos com a adição de cal e verificar a sua influência nas características mecânicas da amostra foi alcançado.

A resistência à compressão simples aumenta de forma linear com o aumento do teor de cal para o tipo solo utilizado. Amostras moldadas com um peso específico aparente seco maior do que o encontrado no ensaio de compactação apresentaram um aumento de 150% na resistência. Amostras moldadas com 35% de umidade foram as que apresentaram menores valores de resistência.

Nota-se também, que a variação do crescimento da resistência está diretamente ligada com a massa específica aparente seca e a umidade da mistura. Para γ_d maiores, esta variação é maior com o aumento do teor de cal, já para w maiores está variação é menor.

A possibilidade da moldagem de corpos de prova com γ_d maior do que o encontrado no ensaio de compactação demonstra que o peso específico aparente seco e a umidade ótima do solo podem variar com a adição de cal. Ou ainda, pode-se questionar as técnicas descritas pela NBR 7182/1986 para a realização deste ensaio, considerando-se o tipo de solo utilizado nesta pesquisa.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, para a mistura solo-cal utilizada, existem várias maneiras de se atingir as propriedades mecânicas desejadas para um determinado projeto. Há a possibilidade de serem feitas diferentes combinações entre teor de cal, densidade de compactação e teor de umidade, dependendo da disponibilidade de equipamentos e água e do custo da cal.

Visando dar continuidade a este trabalho, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

a) A verificação da alteração das propriedades mecânicas de misturas solo-cal em tempos de cura mais longos;

b) A execução de ensaios de resistência à tração, os quais já foram realizados com as amostras utilizadas nesta pesquisa, mas sem sucesso, devido à fragilidade dos CPs;
c) A utilização de outros agentes cimentantes para o mesmo tipo de solo;
d) Avaliação do grau de saturação das amostras ensaiadas, para análise do efeito da sucção na sua resistência;
e) Avaliação do efeito da cal na curva de compactação.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

REFERÊNCIAS

ALVES, A. K. **Análise de Distribuição de Tamanho de Partícula por Difração a Laser.** Aula de Análise Instrumental. LACER, PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7175**: Cal hidratada para argamassas- requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-12253**: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solo com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Geotécnica de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BONAFÉ, L. **Estudo da resistência de um solo residual de basalto estabilizado e reforçado**. Trabalho de Pesquisa (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

BUENO, E. S. **Estudo de alguns fatores que podem afetar a durabilidade de misturas solo-cal**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. Ed. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CASANOVA, F. J. **Revista Téchne: Alvenaria de Solo-Cimento**. A Revista do Engenheiro Civil. Pini: 85. ed, p 30-36, 2004.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CRAIG, R. F. **Craig**: mecânica dos solos. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 180/94**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994.

FIORI, Alberto Pio; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** Curitiba, PR: UFPR, 2009.

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

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization:** principles and practices. Sydney: Butterworths, 1972.

JOSÉ F. E. B. et. al. **Análise da estabilização com cal de solos do município de Limoeiro do Norte, Estado do Ceará**. Florianópolis: 33º Reunião Anual de Pavimentação, 2002.

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

MACHADO, S. L. MACHADO, M. F. **Mecânica dos Solos I:** conceitos básicos. Salvador, 1997.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)

MACHADO, S. L. MACHADO, M. F. **Mecânica dos Solos II:** conceitos básicos. Salvador, 1997.

MARQUES, G. L. O. **Notas de aula – Pavimentação**. UFJF – Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, 2004.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: Estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ROSA, D. A. **Validação da relação vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado.** Trabalho de Diplomação (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUZA PINTO, Carlos de. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

WESSELING, D. H. et al**. Influência do Tempo de Cura na Resistência de Um Solo Estabilizado Com Cal**. Trabalho de Pesquisa (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2002.

BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES (http://www.univates.br/bdu)