

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ERMÍNIA DE FÁTIMA MALAGODI

**ESTUDO DO MELHORAMENTO DO SOLO COM A ADIÇÃO DE CAL
HIDRATADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2019

ERMÍNIA DE FÁTIMA MALAGODI

**ESTUDO DO MELHORAMENTO DO SOLO COM A ADIÇÃO DE CAL
HIDRATADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Maurício do Espírito Santo Andrade

TOLEDO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 191

Estudo do melhoramento do solo com a adição de cal hidratada

por

Ermínia de Fátima Malagodi

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **05 de junho de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a M.^a Ana Claudia Bergmann
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Elmagno Catarino Santos Silva
(UTFPR – TD)

Prof Dr Maurício do Espírito Santo Andrade
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fulvio Natercio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho acima de tudo aos meus pais, Eurico e Maria, que me deram a vida e me ensinaram a lutar com afinco pelos meus objetivos, sem deixar de lado os princípios éticos e morais. Também aos meus queridos irmãos Luiz Carlos, Vagner, José Valter, Dovanil, José Osvaldo, Vanderlei, Valdemir e Maria Cristina. A vocês e tantos outros familiares e amigos, pela saudade e pela distância nestes anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas portas abertas, pela sabedoria e por todas as pessoas maravilhosas colocadas em minha vida que me ajudaram e ajudam a superar os obstáculos pelo caminho;

A minha família, alicerce da minha vida;

A todos meus amigos de longa data, cada um é um tijolinho na construção daquilo que estou me tornando;

A todos os amigos da UTFPR, em especial à Ana Lígia Cestari, Cláudia Terres, Felipe Fraveto, Fernando Göhl, Gabriela Bonetti, Lucas Broglio e Suellen Gabriel, pelo apoio que sempre me deram;

As minhas coinquilinas que me aturaram nesse último ano, Ariana Ramos, Manuele Harnisch, Paloma Vieira e Stephanie Ramos;

Agradeço imensamente ao Professor Maurício Andrade, pela maravilhosa orientação, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e por todas as horas dedicadas à assistência na elaboração deste trabalho;

Aos técnicos de laboratório Marcos e Wilson pela ajuda na realização dos ensaios;

Aos ex-acadêmicos e amigos Alexandre Leite e Jennifer Wurzius, cujos trabalhos serviram de base para a realização deste;

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR- Toledo pela dedicação à arte de ensinar, ajudando a construir e realizar sonhos;

Ao professor Elmagno Catarino, pela oportunidade de me tornar monitora em mecânica dos solos, que foi de grande colaboração na concepção deste trabalho;

Aos servidores do NUAPE Amália Senger, Karen Bariccatti, Leoni Wammes e em especial ao psicólogo Adriano Penna, cujo apoio foi fundamental em momentos difíceis;

A banca avaliadora pela disponibilidade e tempo dedicado;

A todos servidores da UTFPR, que direta ou indiretamente colaboraram com a concretização deste TCC;

Por fim, agradeço a todos que não pude mencionar aqui, mas que de alguma forma contribuíram na construção deste sonho.

*“Inseguì ciò che ami e finirai per amare ciò
che trovi.”*

(CARLO COLLODI)

RESUMO

O solo é um elemento de suma importância na engenharia civil, atuando como suporte de obras e matéria prima em aterros e estruturas de contenção. No entanto, apesar da sua grande aplicabilidade, trata-se de um material heterogêneo, complexo e instável, fato este que pode acarretar em problemas nas construções e levá-las até mesmo ao colapso. Assim, o presente trabalho consistiu no estudo do melhoramento mecânico de um solo característico do município de Toledo – Paraná, mediante adição de cal hidratada nas proporções de 3%, 6%, 9% e 12%. Para tal, uma ampla revisão bibliográfica e ensaios laboratoriais de cisalhamento direto foram realizados. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de cal ao solo proporcionou alteração nos parâmetros físicos (índice de vazios e grau de saturação, aqui avaliados), na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento do mesmo. Por meio de análises gráficas foi possível quantificar a variação dos parâmetros supracitados, verificando-se ao final, a efetiva melhora do solo quando tratado com cal. Em particular, a proporção de 6% se destaca das demais, com menor índice de vazios e grau de saturação e maior resistência ao cisalhamento. Assim, o referido teor de cal mostrou-se mais indicado para melhoramento mecânico desse solo.

Palavras-chave: Solo cal. Cisalhamento direto. Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

The soil is an element of paramount importance in the civil engineering, acting as support for construction and raw material in landfills and containment structures. However, despite its great applicability, it is a heterogeneous, complex and unstable material, this fact can cause problems in the construction and lead to collapse. Thus, the present work consisted in the study of the mechanical improvement of a typical soil of the city Toledo - Paraná, by addition hydrated lime in proportions of 3%, 6%, 9% and 12%. For this purpose, a broad bibliographic review and laboratory tests of direct shear were made. The results showed that the addition of lime to the soil resulted in changes in physical parameters (void ratio and degree of saturation, analyzed here), in the compressibility and in the shear strength thereof. By means of graphical analysis it was possible to quantify the variation of the aforementioned parameters, verifying, at the end, the effective improvement of the soil when treated with lime. In particular, the proportion of 6% stands out from the others, with lower void ratio and degree of saturation and greater resistance to shear. Thus, said lime content was more indicated for mechanical improvement of this soil.

Keywords: Soil-lime. Direct shear. Shear strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis dos diferentes tipos de solos.....	16
Figura 2 - Mapa geológico e geomorfológico do Estado do Paraná.....	17
Figura 3 - Mapa de solos do Estado do Paraná	17
Figura 4 - Esquema representativo de reações químicas da cal.....	23
Figura 5 - Mecanismo da estabilização solo-cal.....	25
Figura 6 - Local da coleta das amostras de solo.	30
Figura 7 - Compactação e extração das amostras de solo compactado.....	31
Figura 8 - Moldagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento.....	31
Figura 9 - Caixa de cisalhamento.....	32
Figura 10 - Prensa para ensaio de cisalhamento direto.....	32
Figura 11 - Ruptura de corpo de prova após ensaio de cisalhamento.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pesos específicos	29
Tabela 2 - Umidade ótima e de ensaio para as diferentes proporções de cal.....	37
Tabela 3 - Valores de resistências de ruptura e residual e deslocamentos horizontal e vertical	42
Tabela 4 - Ângulo de atrito e coesão das misturas solo cal.	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Solo passante x abertura da malha – ABNT.....	27
Gráfico 2 - Curvas de compactação.	28
Gráfico 3 - Índice de vazios x percentual de cal.	36
Gráfico 4 - Grau de saturação x percentual de cal.	37
Gráfico 5 - Tensão cisalhante x deslocamento horizontal, fixada a tensão normal. ...	38
Gráfico 6 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais	39
Gráfico 7 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais.	40
Gráfico 8 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais.	41
Gráfico 9 - Razão de resistência x deslocamento horizontal para solo cal 3%.	43
Gráfico 10 - Deslocamento horizontal x deslocamento vertical, variando percentual de cal.....	43
Gráfico 11 - Envoltórias de Coulomb.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Origem e formação do solo de Toledo- PR	15
2.2	Melhoramento de solos	18
2.2.1	Solo-cimento	20
2.2.2	Solo-fibras	20
2.2.3	Solo reforçado com pneus	21
2.2.4	Solo-cal	22
2.3	Solo característico de Toledo-PR tratado com cal	26
2.3.1	Granulometria	27
2.3.2	Limites de plasticidade e liquidez	27
2.3.3	Teor de umidade ótima e compactação	28
2.3.4	Peso específico das partículas	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Material de estudo	30
3.2	Preparação das amostras para ensaio de cisalhamento direto	30
3.3	Ensaio de cisalhamento direto	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Índice de vazios, umidade e grau de saturação	36
4.2	Ensaio de cisalhamento direto	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O solo é um elemento fundamental na engenharia civil, pois é o principal suporte de obras, além de ser matéria-prima na construção de estruturas de contenção e aterros. No entanto, sua instabilidade pode causar problemas de trincas e rachaduras nas construções, ruptura nos aterros, deslizamento em taludes e túneis, danos em pavimentos, recalques nas estruturas e deformações em maciços compactados, colocando em risco a segurança (GUTIERREZ, 2005).

Assim, o solo, enquanto um material heterogêneo, complexo e instável, exige uma melhora nas suas características naturais, visando uma aplicabilidade mais abrangente dentro da engenharia. Com o objetivo de melhor aproveitamento desse material, surgiram técnicas que visam contornar os problemas supracitados de forma eficaz e econômica (INGLES; METCALF, 1973).

O conceito de melhoramento dos solos não é atual, segundo Neves (2009), foram encontrados registros desses materiais tratados com cal datados do século I, tanto na Roma Imperial, em caminhos e aquedutos, como na construção da Grande Muralha da China. No entanto, foi a partir do século XX com a evolução da mecânica dos solos, que passou a ser estudado com embasamento científico.

Em 1947, foram construídos no Texas, Estados Unidos, 120 km de infraestruturas de estradas rodoviárias tratadas com cal, a partir da década de 50 esta técnica teve um ritmo crescente no referido país, posteriormente, a partir da década de 60, alguns países da Europa também aderiram à aplicação de cal na estabilização de solos (NEVES, 2009).

Segundo Fiquerola (2004), a estabilização química de solos no Brasil iniciou-se em meados de 1948, para reforços de bases e sub-bases na pavimentação, porém, somente a partir de 1978 passou a ser mais amplamente aplicada. Silva (2007) cita o uso de outros métodos de melhoramento de solo, como o solo-cimento, fibras, materiais betuminosos, resíduos da construção civil, etc.

Assim, baseando-se em abordagens teóricas e ensaios laboratoriais referentes à resistência mecânica dos solos, este estudo busca verificar o efeito que a adição da cal hidratada, como aditivo, em diferentes proporções, pode atribuir a um solo típico da cidade de Toledo - Paraná.

1.1 Justificativa

Ingles e Metcalf (1973), apontam três alternativas para quando o solo não apresenta as características desejadas (permeabilidade, estabilidade de volume, resistência e durabilidade), sendo elas: alterar o projeto em função das restrições impostas pelo solo, substituir o material por outro que satisfaça as especificações propostas pelo uso, ou utilizar o solo alterando suas propriedades. Dentre as soluções apontadas, a terceira é a que se apresenta maior eficácia financeira e técnica.

Com o propósito de resolver os problemas de instabilidade a partir da adição de estabilizantes ao solo, são necessários estudos que visem a construção da evidência da melhora do mesmo. Assim baseada nos conhecimentos sobre os mecanismos de interação do solo em conjunto a outros elementos, a fim de encontrar soluções satisfatórias.

Segundo Neves (2009), resolver os problemas de instabilidade do solo, através da adição de cal, é uma solução viável ambiental e economicamente, e se mostra eficiente do ponto de vista técnico. A cal é um estabilizante barato e amplamente utilizado na pavimentação e em aterros. Além disso, esse material tem apresentado bom desempenho no aumento da capacidade de carga e na redução de recalques em construções com fundações superficiais (ROSA, 2009).

Nesse contexto, busca-se contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico das misturas solo-cal hidratada, a partir da análise de fatores que podem influir no seu bom desempenho quando empregados na engenharia civil, restringindo-se, ao estudo do solo típico de Toledo-PR.

1.2 Objetivos

Determinar qual a proporção de cal hidratada deve ser adicionada à um solo característico do município de Toledo, no Estado do Paraná, com intuito de obter-se melhores resultados em termos de resistência mecânica.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

Verificar o efeito da adição de cal na resistência ao cisalhamento dos solos argilosos;

Quantificar a alteração em propriedades físicas, tais como índice de vazios inicial e grau de saturação, e mecânicas que a incorporação de cal hidratada, atribui ao solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem e formação do solo de Toledo- PR

Caputo (2012) e Pinto (2006) explicam que o processo de formação dos solos, que ocorre em milhões de anos, gradual e ininterruptamente, tem origem na decomposição da rocha mãe por agentes do intemperismo e interação entre as rochas com o ambiente.

Conforme Press et al. (2006), a natureza da rocha matriz é determinante no processo do intemperismo, devido à sua vulnerabilidade de sofrer fragmentação e dissolução dos minerais constituintes. O clima, a mineralogia e composição química são fatores preponderantes no processo de intemperização.

Os solos podem ser classificados como residuais ou transportados. Residuais são aqueles formados a partir da meteorização da rocha mãe, mas que permanecem no lugar de sua formação. Segundo Das (2007), os solos residuais podem apresentar grãos finos na superfície, a granulometria tende a aumentar com o aumento da profundidade, apresentando fragmentos de rochas em maiores profundidade.

Os solos transportados por sua vez, como o próprio nome sugere, são aqueles desagregados da rocha matriz e portados pela ação da água, vento ou gravidade a outros lugares (CAPUTO, 2012).

Press et al. (2006), divide o solo em três grupos principais:

Grupo **Pedalfer**, característico de clima úmido e temperatura moderada, esse tipo de solo tende a apresentar influência da rocha matriz quando de sua formação. Após milhares de anos, podem perder a composição original e desenvolver argilominerais semelhantes a um solo formado sob as mesmas condições, porém originados a partir da decomposição de diferentes rochas. O solo pedalfer normalmente é bom para a agricultura e apresenta um horizonte A em seu perfil, rico em húmus, conforme Figura 1 (a). Os óxidos de ferro e alumínio entre outros materiais solúveis estão presentes no horizonte B. Já no horizonte C apresenta um substrato de granito.

Os solos **Lateritos**, formados em clima tropical (quente e úmido), são fruto das reações químicas que ocorrem entre a água e os silicatos presentes na rocha

matriz, dos quais se destaca o Feldspato. O horizonte A desse tipo de solo pode conter uma fina camada de húmus ou nem mesmo contê-la, o horizonte B, por sua vez, apresenta-se bastante espesso, contendo óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e argilominerais como a caulinita. Nas interfaces dos horizontes B e C, ocorre a formação de uma fina zona lixiviada, o substrato é formado por rochas ígneas, como mostrado na Figura 1 (b).

Os solos do grupo **Pedocal**, representado no perfil (c) da Figura 1, se formam em clima seco e tem sua composição influenciada principalmente pela rocha matriz, podendo conter minerais inalterados e/ou fragmentos da mesma. Normalmente é um solo rico em cálcio e outros minerais solúveis, além de ser pobre em matéria orgânica.



Fonte: Press et al. (2006).

O município de Toledo está localizado no chamado Terceiro Planalto, sobre a formação Serra Geral na região Oeste do Estado do Paraná. Conforme mostrado na Figura 2, a formação geológica é constituída por extensos derrames de rochas magmáticas, predominantemente as basálticas, da Era Mesozoica do período Jurássico - Cretáceo inferior (MINEROPAR, 2001).

Assim, o solo do município de Toledo, teve sua origem principalmente na degradação das rochas basálticas, a partir do qual foram gerados solos do tipo Latossolo Vermelho Distroférico e Nitossolo Vermelho Eutroférico (IBGE, 2001;

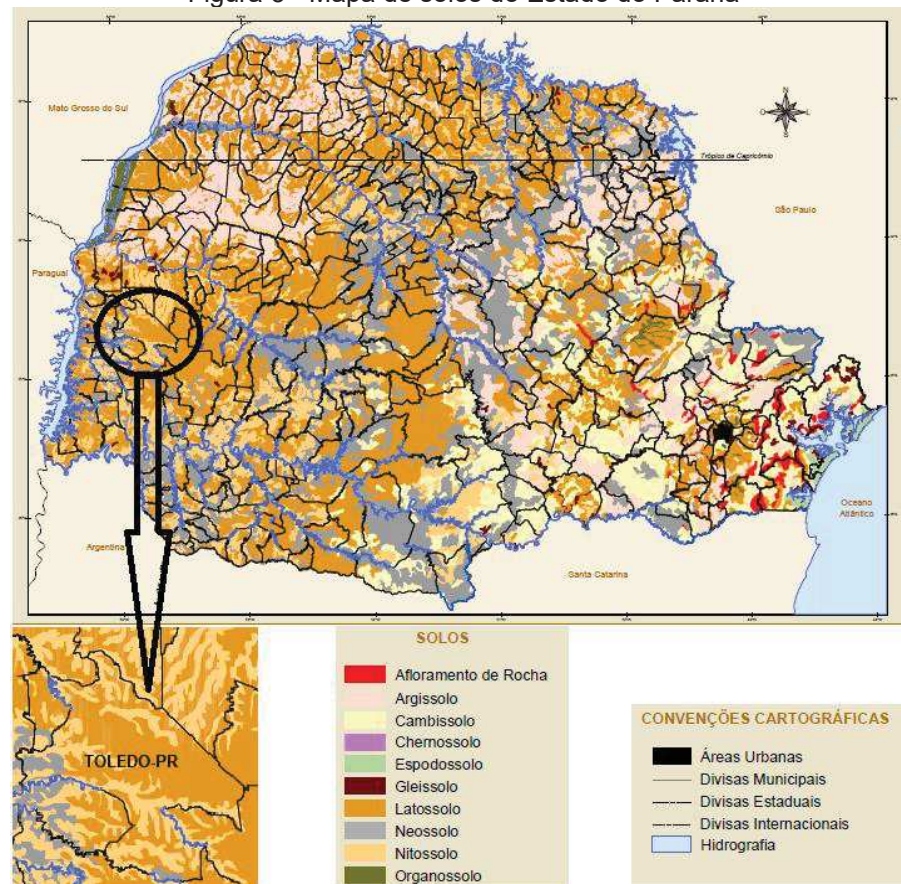
EMBRAPA, 2007). O latossolo é predominante no município, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 2 - Mapa geológico e geomorfológico do Estado do Paraná



Fonte: Licht [ca. 2000].

Figura 3 - Mapa de solos do Estado do Paraná



Fonte: Adaptado ITCG (2008).

Segundo Gonçalves (2006), os solos lateríticos (pertencentes ao grupo laterito), como também são denominados os latossolos, estão presentes em mais de

60% do território brasileiro, uma vez que sua formação é facilitada pelas condições climáticas do país. Gutierrez (2005) afirma que cerca de 30% do solo paranaense é constituído por latossolo.

As rochas ígneas, como o basalto, normalmente são ricas em feldspato, que se decompõe mais facilmente quando comparado ao quartzo e alguns outros silicatos, e tendem a formar um solo fino. O feldspato, quando em contato com a água e o gás carbônico, reage quimicamente formando a caulinita, a sílica e íons de potássio e bicarbonato. A caulinita é hidratada pela água enquanto a sílica e íons formados são lixiviados (PRESS et al., 2006).

Outros silicatos ricos em ferro, como o piroxênio e a olivina, e os aluminossilicatos também são dissolvidos no processo do intemperismo das rochas basálticas, deixando no solo os óxidos de ferro e alumínio. Essa situação justifica a coloração vermelha ou amarela, característica da ferrugem, nos solos lateríticos (GUTIERREZ, 2005; PRESS et al., 2006).

Ghidin et al. (2006) e Gutierrez (2005) relatam que latossolos de origem basáltica da região da Bacia do Paraná, tem sua textura muito argilosa. Frequentemente, esses solos apresentam camadas que podem atingir de 10 a 15 metros no horizonte B e possuem coloração avermelhada.

Godoy (1997) ressalta que, os solos lateríticos quando compactados em condições específicas (energia de compactação e umidade ótima) adquirem resistência alta e boa capacidade de suporte, porém Gutierrez (2005), verificou que o mesmo pode apresentar características de solo colapsível, ou seja, redução brusca de volume quando elevado o teor de umidade.

Segundo Amadi (2010), os solos lateríticos podem apresentar características inadequadas para a engenharia tais como, alta plasticidade, baixa trabalhabilidade, baixa resistência, alta permeabilidade, tendência de reter umidade e alto teor de umidade natural. O uso efetivo desses solos é, portanto, muitas vezes dificultado pela complexidade do manuseio.

2.2 Melhoramento de solos

Nenhum método de estabilização dos solos pode ser considerado mais eficaz que outro devido à grande variabilidade do solo, assim, devem ser estudadas

as características do mesmo e verificar quais propriedades deseja-se que sejam modificadas. São quatro propriedades do solo que afetam sua qualidade para uso na construção: estabilidade de volume, resistência, permeabilidade e durabilidade (INGLES; METCALF, 1973).

A estabilidade de volume, está relacionada ao fato de que alguns solos argilosos, apresentam variação volumétrica conforme o teor de umidade, esses são denominados solos expansivos (aumentam de volume) ou colapsíveis (diminuem o volume). Essa característica provoca ações indesejadas nas estruturas apoiadas sobre esses materiais, como o rompimento de estradas, entortamento de postes, trincas em edifícios, problemas em tubulações subterrâneas, causando perdas econômicas e riscos à segurança (OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006).

Assim como a variação de volume, a resistência dos solos está relacionada à segurança e à estabilidade das estruturas. Em solos argilosos, a resistência ao cisalhamento está condicionada à consistência da mesma e ao teor de umidade. Alguns métodos de melhoramentos de solos que consistem em aumentar a resistência buscam elevar a rigidez destes, através da compactação e/ou alteração da granulometria com aditivos (INGLES; METCALF, 1973).

O conceito de permeabilidade está relacionado ao movimento da água através dos solos, e abrange tópicos importantes dentro da engenharia, como o cálculo de vazões, análise de recalques e estudos de estabilidade das estruturas (PINTO, 2006).

A alta permeabilidade está associada à dissipação mais rápida de pressões neutras e às infiltrações. Quando ocorre em regiões de chuvas intermitentes, pode ocasionar alteração do nível do lençol freático causando efeitos nocivos às estruturas, conduzindo à recalques nas construções (MARANGON, 2018).

A durabilidade, por sua vez, está relacionada à resistência que o solo possui em relação aos processos de intemperismo, de erosão e do próprio uso, quando este é suscetível ao desgaste pelos processos citados, podem apresentar problemas em superfícies de estradas e pavimentos, canais de drenagem, pontes, paredes de adobe, etc. Quando ocorre erosão interna, provocando a remoção de partículas do interior do solo (*piping*), pode causar permeabilidade excessiva reduzindo a durabilidade (INGLES; METCALF, 1973).

Segundo Silva (2007), tendo em vista o controle dessas propriedades, distintas para cada tipo de solo, o uso de aditivos ganha destaque na capacidade de controlar efeitos indesejados quando necessário, podendo ser utilizados materiais diversos dependendo da característica que se busca melhorar. A seguir destacam-se alguns.

2.2.1 Solo-cimento

A Norma Brasileira - NBR 12023 (ABNT, 2012) - Solo cimento - Ensaio de compactação, define solo cimento como “Produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem”.

O melhoramento do solo com adição de cimento é uma prática bastante comum na pavimentação, de acordo com Guedes, Coutinho e Fonseca (2015), a adição de cimento ao solo, desencadeia uma série de alterações em suas propriedades. A magnitude dessas alterações depende, por sua vez de diversos fatores, como características do próprio solo, quantidade de cimento adicionado, teor de umidade, energia de compactação, tempo de cura e temperatura.

Lima et al. (1993) explicam que, para solos granulares, a adição de cimento resulta no desenvolvimento de ligações intergranulares melhorando a coesão da mistura. Por outro lado, em solos finos, partículas de solo tendem a se aglutinar ao redor dos grãos de cimento formando um material de maior granulometria.

Bernucci et al. (2006) ressaltam que embora todos os tipos de solos possam ser tratados com cimento, em solos argilosos o teor de cimento poderá ser maior, tornando-se assim mais oneroso, o teor de cimento recomendado é entre 5 e 9% para estar numa faixa economicamente viável. Em geral, solos tratados com cimento apresentam significativa melhora na resistência de tração e compressão.

2.2.2 Solo-fibras

O reforço de solos com fibras, embora seja um conceito antigo, segundo Casagrande (2001) vem sendo aprimorado nas três últimas décadas. As fibras

usadas como reforço nos solos podem ser de origem natural, polimérica, mineral ou metálicas.

Feuerharmel (2000) verificou um aumento na resistência ao cisalhamento tanto nas argilas como em areias quando adicionado fibras de polipropileno, o autor verificou ainda que, quanto maior o comprimento das fibras melhores os resultados. Além do comprimento e diâmetro das fibras, segundo Teodoro (1999), outros fatores que afetam o comportamento das misturas solo fibras são: a orientação em que estas ficam dispostas, as tensões a que são submetidas, energia de compactação e teor de umidade.

Casagrande (2001) ainda ressalta que a interação entre solo e fibras se dá na forma de um compósito, que é a união de dois ou mais elementos, onde um deles é a matriz (no caso, o solo), e os outros o reforço. A autora explica que as fibras incorporadas ao solo aumentam a capacidade de tração do mesmo redistribuindo tensões de deformação no interior do solo.

2.2.3 Solo reforçado com pneus

Com os problemas ambientais causados pelo excesso de descarte de pneus, alguns estudos foram realizados no âmbito de buscar meios para o aproveitamento dos mesmos dentro da geotecnia.

Agregar fragmentos de borracha de pneus ao solo pode ser um método para minimizar o problema ambiental, no entanto, os ensaios realizados com adição de fragmentos de pneus com diâmetro de aproximadamente 1 cm não se mostrou eficaz para melhora na resistência do solo, pois apresentou uma tendência de ruptura nas interfaces solo-fragmento de pneu (CHRUSCIAK, 2013).

Ramírez (2012) verificou a diminuição no peso específico seco e teor de umidade ótima de um solo argiloso quando da adição de fragmentos de borrachas de pneu, o estudo realizado com fragmentos de pequeno diâmetro, em média 1 mm apresentou resultados contundentes, dependendo da porcentagem de borracha e das tensões de confinamento efetivas que foram aplicadas em ensaios triaxiais. Segundo esses estudos a melhor porcentagem é de solo 90% e borracha 10%.

Devido à variabilidade de resultados, de acordo com os diâmetros dos fragmentos de pneu e o tipo de solo que se deseja trabalhar, antes do uso de

borracha como aditivo devem ser verificados os critérios técnicos desejados a fim de verificar viabilidade do uso (CHRUSCIAK, 2013).

2.2.4 Solo-cal

A cal é um material muito utilizado na construção civil como aglomerante, a mesma garante o endurecimento e o melhor desempenho da argamassa tanto no assentamento quanto no revestimento, devido à plasticidade e à durabilidade que acrescentam ao ser unida a argamassa (BAUER, 2000).

Os produtos à base de cal são originários da pedra de calcário composta por carbonato de cálcio (CaCO_3) e por outros constituintes. A cal é gerada através da calcinação do calcário a temperaturas aproximadas de 900°C , ocorre neste processo a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

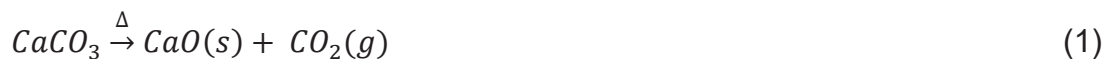
A cal é classificada em dois tipos de aglomerantes, os hidráulicos, que reagem em contato com a água, onde se destacam a cal hidráulica e os cimentos. O outro grupo é dos aglomerantes aéreos, que reagem em contato com o ar, neste grupo está o hidróxido de cálcio resultante da reação do óxido de cálcio com a água (SANTOS, 2008).

A cal aérea é o aglomerante resultante da calcinação, de uma rocha com porcentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou, carbonato de cálcio e magnésio. Essa cal não apresenta propriedades hidráulicas, sendo seu endurecimento através da reação lenta de carbonatação, feita pela ação do ar atmosférico. A cal aérea subdivide-se em cal viva/virgem e cal hidratada/apagada, as duas se diferem pela sua suscetibilidade à água (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

Cal viva ou cal virgem: obtida por meio do cozimento dos calcários a temperaturas compreendidas entre 800°C e 900°C . Quando alcançada uma temperatura de aproximadamente 894°C observa-se que a pressão de dissociação do carbonato de cálcio (pressão em que o gás é liberado do calcário) é superior à pressão atmosférica, o que resulta na formação de óxido de cálcio mais dióxido de carbono a partir da decomposição do carbonato de cálcio (SILVA, 2010).

A cal hidratada ou cal apagada: resulta do tratamento da cal virgem com uma quantidade de água suficiente para satisfazer sua afinidade química com a água, sob as condições de hidratação (SILVA, 2010).

Quando o calcário natural é submetido a temperaturas em torno de 900° C, o carbonato de cálcio presente neste se decompõe em óxidos de cálcio e anidridos carbônicos, esse processo é chamado de calcinação e pode ser representado pela Equação 1 (BAUER, 2000):



Os óxidos de cálcio gerados na calcinação têm estrutura porosa e formato idêntico aos grãos originais, é a chamada cal viva. Antes de ser aplicada em construções, esta deve ser primeiramente hidratada, para passar de óxido a hidróxido, o processo recebe o nome de extinção ou hidratação, e é regida pela Equação 2 (BAUER, 2000).

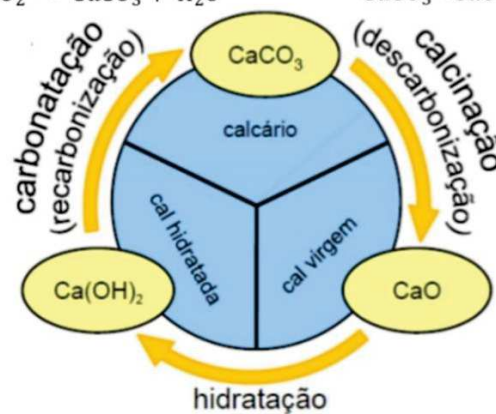


A cal hidratada, por sua vez, reage com o ar atmosférico no processo chamado de carbonatação, descrito pela Equação 3.



Com esses processos, fecha-se um ciclo como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema representativo de reações químicas da cal
 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ $CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO(s) + CO_2(g)$



$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$
 Fonte: Aragão (2015).

A cal hidráulica, por sua vez, é obtida por cozimento de calcários com porcentagens de argilas geralmente entre 5 % e 20 % a uma temperatura entre 1200° C e 1500° C. Além da formação do óxido de cálcio, dá-se a combinação deste com a sílica e a alumina, resultando na presença de silicatos e aluminatos que, quando hidratados, dão origem a produtos que endurecem tanto na água como no ar (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Além de aglomerante, a cal é usada como aditivo em solos para fins de estabilização devendo-se ao fato desta ser um excelente reagente, que torna o solo impermeável. Assim melhora a relação custo x benefício, que visa aproveitar o solo e proporcionar maior capacidade para resistir a carregamentos e intempéries (SARTORI, 2015).

Para o uso na estabilização de solos, somente a cal aérea apresenta as propriedades desejáveis que são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio. Não se usa a cal hidráulica para estabilização de solos (SANTOS, 2008).

Segundo Silva (2010), tanto a cal virgem como a cal hidratada podem ser utilizadas, a escolha entre uma ou outra deve levar em consideração o teor de água no solo. Assim, em solos argilosos com teor de água acima do valor ótimo para compactação, será mais vantajoso a utilização de cal virgem, isso conduz a uma secagem rápida do solo, de modo que haja uma redução na quantidade de água até valores próximos do teor ótimo. Já nos solos argilosos em que o teor de água é inferior ao seu valor ótimo, é mais indicado utilização da cal hidratada. A utilização de cal virgem no solo de baixa umidade, implicaria na adição de maior quantidade de água para hidratá-la e promover as reações físico-químicas de estabilização, o que levaria à formação de uma mistura não homogênea a tornando menos eficiente.

As reações que levam o solo a estabilização através da adição de cal normalmente são divididas em três, troca iônica e floculação, cimentação e carbonatação. As mesmas não ocorrem simultaneamente, a troca iônica ocorre imediatamente após a aplicação da cal ao solo, depois ocorre a cimentação que é responsável pela estabilização do solo ao decorrer do tempo, e por fim têm-se a carbonatação que é indesejada nesse tipo de tratamento (SILVA, 2010).

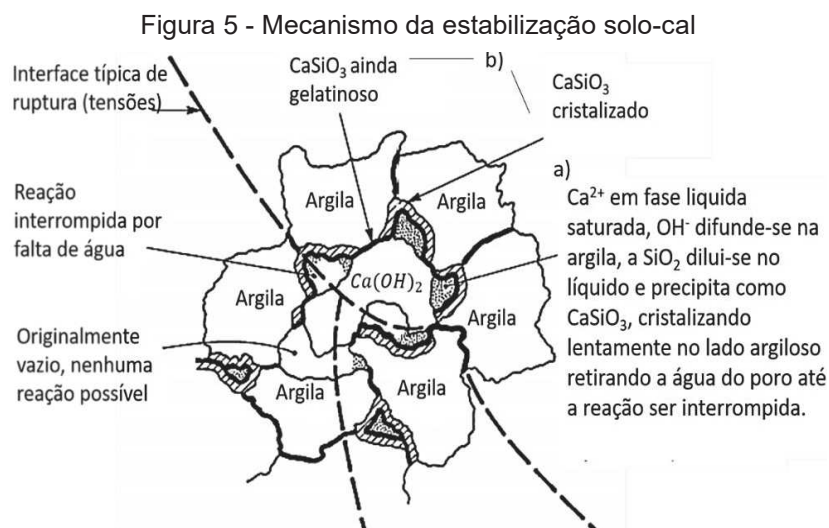
A troca iônica e floculação são as primeiras reações que ocorrem após a adição de cal e pode ser observada na Figura 5 a). A floculação é consequência da

troca iônica e consiste na aglomeração das partículas finas do solo em flocos estáveis, esse fenômeno é responsável pelas alterações na granulometria, plasticidade, compactação, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata (SANTOS, 2008).

A cimentação consiste na reação lenta dos constituintes da argila, particularmente a sílica e a alumina, com a cal, dando origem a materiais cimentícios nas interfaces das partículas de argila e nos vazios entre elas (INGLÊS; METCALF, 1973).

A presença da cal no solo faz aumentar o pH do meio, o que promove a dissolução tanto da sílica SiO_2 como da alumina Al_2O_3 , uma vez que ambas são altamente solúveis em meios fortemente básicos com um $\text{pH} \gg 7$. Os cátions Ca_2^+ reagem com a sílica e a alumina dissolvidas criando novos minerais silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. O composto descrito forma um gel que cristalizado leva à cimentação das partículas entre si, resultando no endurecimento global da mistura solo-cal, conforme Figura 5 b) (SILVA, 2010).

A Carbonatação é o mecanismo de ação química dos minerais argilosos que consiste na reação do íon carbonato CO_3^{2-} ou bicarbonato HCO_3^- , com qualquer substância mineral, em particular as que contêm íons Ca_2^+ , para formar carbonatos de cálcio. Deve-se evitar a carbonatação, uma das formas é minimizar a exposição da mistura solo-cal ao ar, compactando-se o material logo que possível de forma a obter densidades superiores e permeabilidades inferiores, e até serem atingidos volumes de vazios reduzidos (NEVES, 2009).



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1973).

O uso de cal para estabilização de solos funciona devido às propriedades do mesmo que são alteradas, são elas: granulometria, teor em água, plasticidade e compactação (INGLÊS; METCALF, 1973).

O produto da mistura de solo, cal e determinada quantidade de água, tende a formar um material de maior dimensão e mais solto, com aparência arenosa e seca, mudando sua tonalidade para uma mais clara. Os solos com maior granulometria geralmente estão relacionados à maior estabilidade mecânica (SANTOS, 2008).

A redução do teor de água natural do solo se dá após a mistura com cal, devido à ser um material seco, ao arejamento provocado pelo processo de mistura e à reação de hidratação, no caso da cal virgem, estima-se que esta redução em teor de água da mistura solo-cal seja da ordem de 0.6 % a 1.5 % do teor em água inicial do solo, para cada 1 % de cal viva adicionada (SILVA, 2010).

Os limites de consistência do solo são imediatamente alterados com a adição de cal, as alterações na plasticidade do solo estabilizado com cal dependem do tipo de solo e tipo da cal. A variação do limite de liquidez relaciona-se com a composição dos minerais do solo e a presença de argila, a cal virgem aumenta o limite de liquidez em solos mais argilosos com presença mineralógica predominantemente de caulinitas (CASTELLÓ, 2015).

À medida que o teor em cal aumenta, na compactação, o solo estabilizado com cal apresenta densidades inferiores e teor ótimo de umidade superior ao verificado no solo natural, exibindo uma curva de compactação com concavidade cada vez menor. A mudança das características de compactação deve-se ao fenômeno de floculação das partículas argilosas presentes. Isso ocorre porque os grãos das partículas floculadas devido à cal são mais difíceis de se arranjar pela ação mecânica da compactação (SILVA, 2010).

2.3 Solo característico de Toledo-PR tratado com cal

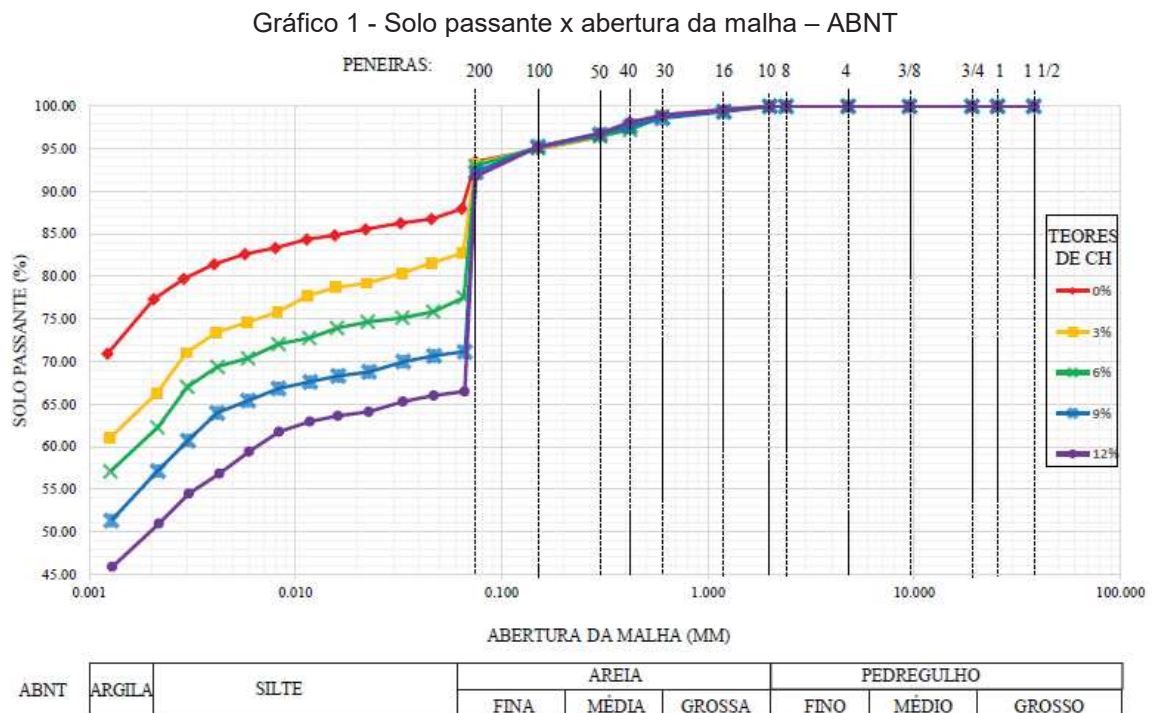
Leite (2018) avaliou a influência que a adição de cal hidratada, nos percentuais de 0%, 3%, 6%, 9% e 12%, provoca nas características de um solo típico do município de Toledo-PR. Para tal, o autor realizou os ensaios de limite de

liquidez, limite de plasticidade, peso específico dos sólidos, sedimentação, peneiramento, compactação e expansão.

2.3.1 Granulometria

Com relação à análise granulométrica, Leite (2018) constatou que o solo estudado, é basicamente composto por partículas finas, mantendo-se assim mesmo após adição de cal.

Na classificação segundo a Associação Brasileira de Normas e Técnicas – ABNT, o referido autor observou a diminuição no teor de argila e acréscimo no teor de areia, com o aumento da proporção de cal adicionada ao solo. Além disso, o mesmo constatou que a maior variação no tamanho das partículas ocorreu na fração passante pela peneira 200 (0,075 mm) (Gráfico 1).



Fonte: Leite (2018).

2.3.2 Limites de plasticidade e liquidez

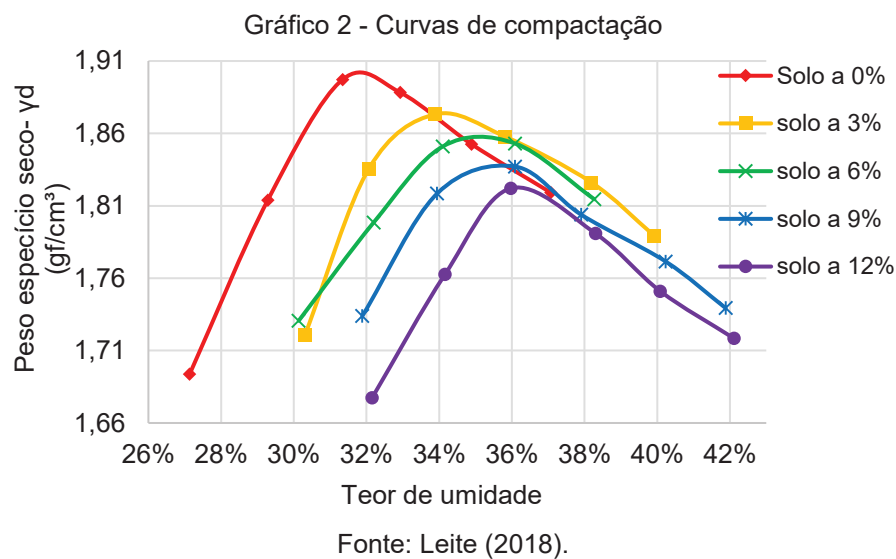
Segundo Leite (2018), a adição de cal ao solo, provocou aumento e decréscimo nos limites de plasticidade e liquidez respectivamente, acarretando

assim na diminuição do índice de plasticidade do mesmo. Essa queda foi de 20% no solo natural para 2% no solo com adição de cal na proporção de 12%, alterando de muito plástico para pouco plástico.

2.3.3 Teor de umidade ótima e compactação

No ensaio de compactação com Proctor Normal, NBR 7182 (ABNT, 2016), foi verificado que a adição de cal hidratada elevou o teor de umidade ótima que variou de 31,8% no solo natural para 36,3% no solo com 12% de cal, também houve redução no peso específico seco (LEITE, 2018).

O Gráfico 2 mostra os deslocamentos provocados nas curvas de compactação devido ao incremento de cal ao solo.



Houve uma variação de 4,5% na umidade ótima (w_{oti}) e de 4,3% no peso específico seco (γ_d) entre o solo natural e o solo com 12% de cal.

2.3.4 Peso específico das partículas

A respeito do peso específico das partículas (γ_s), Leite (2018) verificou que houve aumento no mesmo conforme se adicionava mais cal a mistura, apresentando um aumento de 3,6% entre o solo natural e o solo com 12% de cal (Tabela 1).

Peso específico dos sólidos- γ_s (gf/cm ³)	
Solo natural	2,584
Solo + 3% cal	2,602
Solo + 6% cal	2,628
Solo + 9% cal	2,653
Solo + 12% cal	2,677

Fonte: Adaptado de Leite (2018).

Leite (2018) explica que o aumento do peso específico das partículas pode ser devido às ações cimentícias provocadas pela cal, que ocasionaram um aumento na densidade do solo, porém o autor ressalta que não se deve afirmar tal fato sem um estudo mais apurado, como a microscopia eletrônica de varredura, que permite observar a estrutura do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material de estudo

O solo estudado foi coletado numa área do campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Toledo, cujas coordenadas geográficas são S 24° 44' 003" e W 53° 45' 883" (Figura 6), e uma profundidade de cerca de 2 metros.

Figura 6 - Local da coleta das amostras de solo



Fonte: leite (2018).

A coleta, bem como os ensaios de caracterização e compactação do solo foram realizados por Leite (2018). O presente trabalho trata-se, portanto, de uma continuação do estudo realizado pelo mesmo, constituindo na análise do comportamento mecânico do solo com adição de 0%, 3%, 6%, 9% e 12% de cal hidratada.

3.2 Preparação das amostras para ensaio de cisalhamento direto

O material utilizado foi o mesmo dos ensaios realizados por Leite (2018), o solo encontrava-se embalado em plástico, a fim de se garantir a preservação da umidade e a integridade do material.

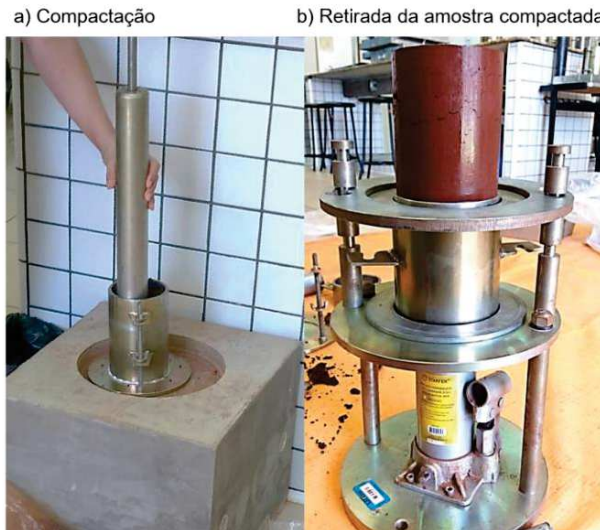
Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto foram confeccionados a partir de amostras compactadas seguindo a NBR 7182 (ABNT, 2016). Desse ponto em diante, sempre que no texto se mencionar cal, entenda-se cal hidratada.

As umidades das misturas solo cal (0%, 3%, 6%, 9% e 12%) foram aferidas e/ou corrigidas para a umidade ótima ($\pm 5\%$), definidas por Leite (2018). Em seguida,

o solo foi passado pela peneira de 4,8 mm, conforme estabelecido pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

As amostras foram compactadas para os diferentes teores de cal (uma amostra para cada porcentagem), em molde cilíndrico pequeno e energia normal, como preconizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016) (Figura 7 a). O solo compactado foi removido do cilindro por meio de uso de extrator (Figura 7 b).

Figura 7 - Compactação e extração das amostras de solo compactado



Fonte: Autoria própria (2019).

De cada uma dessas amostras, foram retirados três corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. O procedimento foi realizado cravando-se uma fôrma (Figura 8) e removendo o solo das arestas externas da mesma até que seu interior estivesse completamente preenchido. Foram moldados 15 corpos de prova, sendo 3 para cada proporção de cal no solo (0%, 3%, 6%, 9% e 12%).

Figura 8 - Moldagem do corpo de prova para ensaio de cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2019).

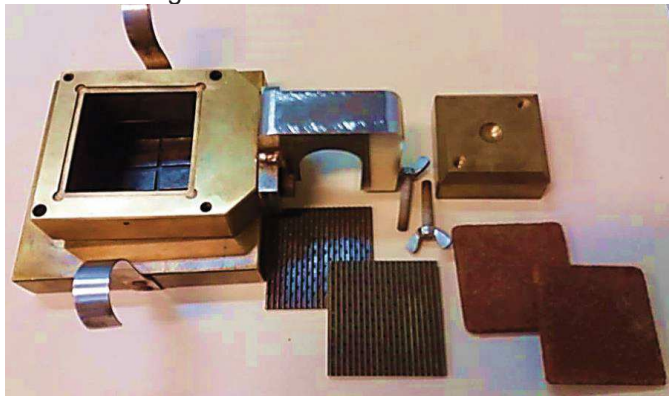
As amostras e corpos de prova que não estavam sendo manipuladas foram envoltas em plástico *film* a fim de se preservar a umidade dos mesmos.

3.3 Ensaio de cisalhamento direto

Os procedimentos do ensaio foram realizados conforme as recomendações da norma americana D 3080 (ASTM, 1998) – *Standard test method for direct shear of soils under consolidated drained condition*.

Na preparação do referido ensaio, o corpo de prova foi expelido da fôrma para o interior da caixa de cisalhamento (Figura 9) e essa foi instalada na prensa de cisalhamento direto (Figura 10).

Figura 9 - Caixa de cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 10 - Prensa para ensaio de cisalhamento direto



Fonte: autoria própria (2019).

Em cada um dos três corpos de prova foi aplicado tensões normais de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. Para tal, foi empregada uma carga no pendural instalado na parte inferior da prensa (figura 10).

Nesta fase do ensaio, a compressão edométrica foi acompanhada até a “estabilização” das deformações verticais. A velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) fixada em 10^{-7}s^{-1} foi utilizada como critério para se definir a referida “estabilização”.

Em seguida, uma velocidade de deformação de 0,1 mm/min foi aplicada na parte superior da caixa de cisalhamento direto, medindo-se então as forças cisalhantes mobilizadas e os deslocamentos vertical e horizontal. Esta velocidade foi escolhida por ser suficientemente baixa de modo a possibilitar a condição drenada do solo compactado. Como não é possível no ensaio de cisalhamento direto medir o excesso de poropressão, as resistências obtidas foram analisadas em termos de tensões totais.

As condições físicas iniciais tais como umidade, índice de vazios e grau de saturação dos corpos de prova foram obtidas mediante cálculo, conforme as Equações 4, 5 e 6. Ressalta-se que, para a efetivação dos referidos cálculos, os pesos específicos dos sólidos utilizados foram aqueles obtidos por Leite (2018) (Tabela 1).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (4)$$

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (6)$$

Em que:

w - Umidade (%);

W_w - Peso de água;

W_s - Peso dos sólidos;

e_0 - Índice de vazios inicial;

V_v - Volume de vazios;

V_s - Volume de sólidos;

S - Grau de saturação (%);

V_w - Volume de água.

Na fase de cisalhamento, as leituras do extensômetro vertical e do anel dinamométrico foram feitas a cada 10 divisões do extensômetro horizontal, equivalente a uma leitura por minuto.

A figura 11 apresenta um corpo de prova típico pós ruptura.

Figura 11 - Ruptura de corpo de prova após ensaio de cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2019).

Os cálculos das tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) são dados pela magnitude das forças aplicada (N) e mobilizada (T), respectivamente, dividida pela área corrigida (A), conforme as Equações 7 e 8.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (8)$$

A área corrigida (A) é a interface de contato entre as partes superior e inferior do corpo de prova (Figura 11), e esta varia com o deslocamento horizontal.

Para cada condição de solo ensaiada, foi possível traçar a envoltória de Coulomb, no plano $\tau \times \sigma$ seguindo a Equação 9.

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\varphi \quad (9)$$

Em que:

τ - Tensão cisalhante na ruptura;

c - “coesão” do solo;

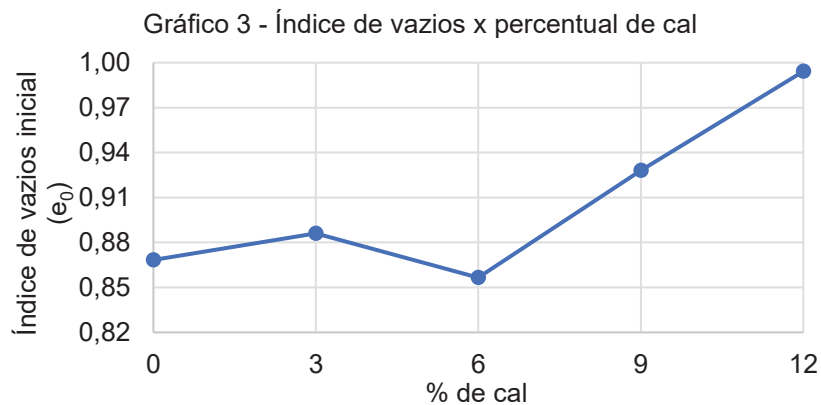
σ - Tensão normal;

φ - Ângulo de atrito entre as partículas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Índice de vazios, umidade e grau de saturação

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, construiu-se o Gráfico 3, onde pôde ser feita a análise da variação do índice de vazios do solo quando da adição de cal em diferentes proporções.

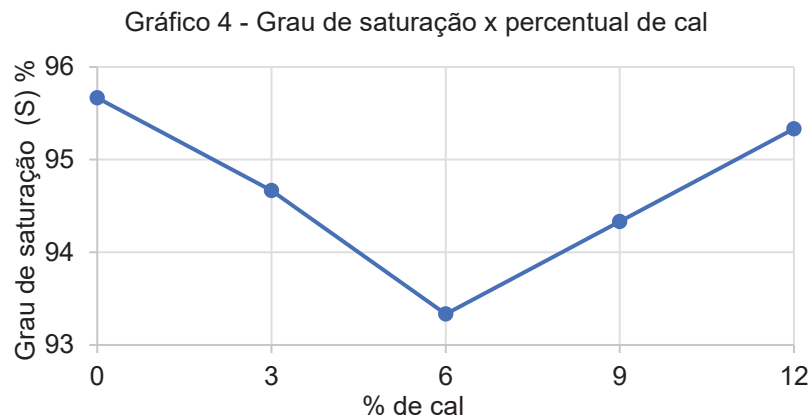


Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 3, verifica-se que houve a tendência de aumento no índice de vazios para as porcentagens de 0%, 3%, 9% e 12% de cal adicionada. A alta entre a menor e maior proporção foi na ordem de 12%, no entanto, verifica-se que para a proporção de 6% de cal adicionada, ocorreu uma queda, apresentando um índice de vazios aproximadamente de 0,86.

No tocante à tendência de alteração no índice de vazios, essa ocorre devido às reações de floculação e cimentação. A aglomeração das partículas de argila ao redor das de cal dá origem à grãos maiores, que, ao se arranjam, acabam deixando mais vazios entre si.

O Gráfico 4 apresenta a variação do grau de saturação com o incremento de cal. Com base nesse, observa-se que houve pouca variação. Ocorrendo uma queda entre o solo natural e o com 6% de cal, e depois aumento para as proporções de 6% a 12%. Em geral, os resultados ficaram em torno de 95% de grau de saturação, o menor valor obtido foi aproximadamente 93% para o solo cal 6%.



Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com Pinto (2006), o grau de saturação do solo para umidade ótima normalmente se encontra em torno de 80% a 90%, portanto, verificou-se que os resultados obtidos estão acima dos tradicionais.

Para o solo cal 6% observa-se que o índice de vazios (Gráfico 3) e o grau de saturação (Gráfico 4) foram inferiores aos demais, presumindo-se assim que a relação solo, teor de cal e umidade possam ter influenciado neste efeito. Para melhor entendimento desse resultado com solo cal 6% faz-se necessário análises químicas e de microscopia de varredura para verificar a estrutura do solo.

Na Tabela 2, encontram-se listados os valores de umidade ótima, obtidas por Leite (2018), e também as de umidades inicial e final dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 2 - Umidade ótima e de ensaio para as diferentes proporções de cal

	Umidade ótima (w_{oti}) (LEITE, 2018)	Umidade inicial (w_0)	Umidade final (w_f)
Solo cal 0%	31,8%	32,1%	31,6%
Solo cal 3%	34,1%	32,3%	32,2%
Solo cal 6%	35,0%	30,8%	30,2%
Solo cal 9%	35,7%	32,6%	31,6%
Solo cal 12%	36,3%	35,4%	34,5%

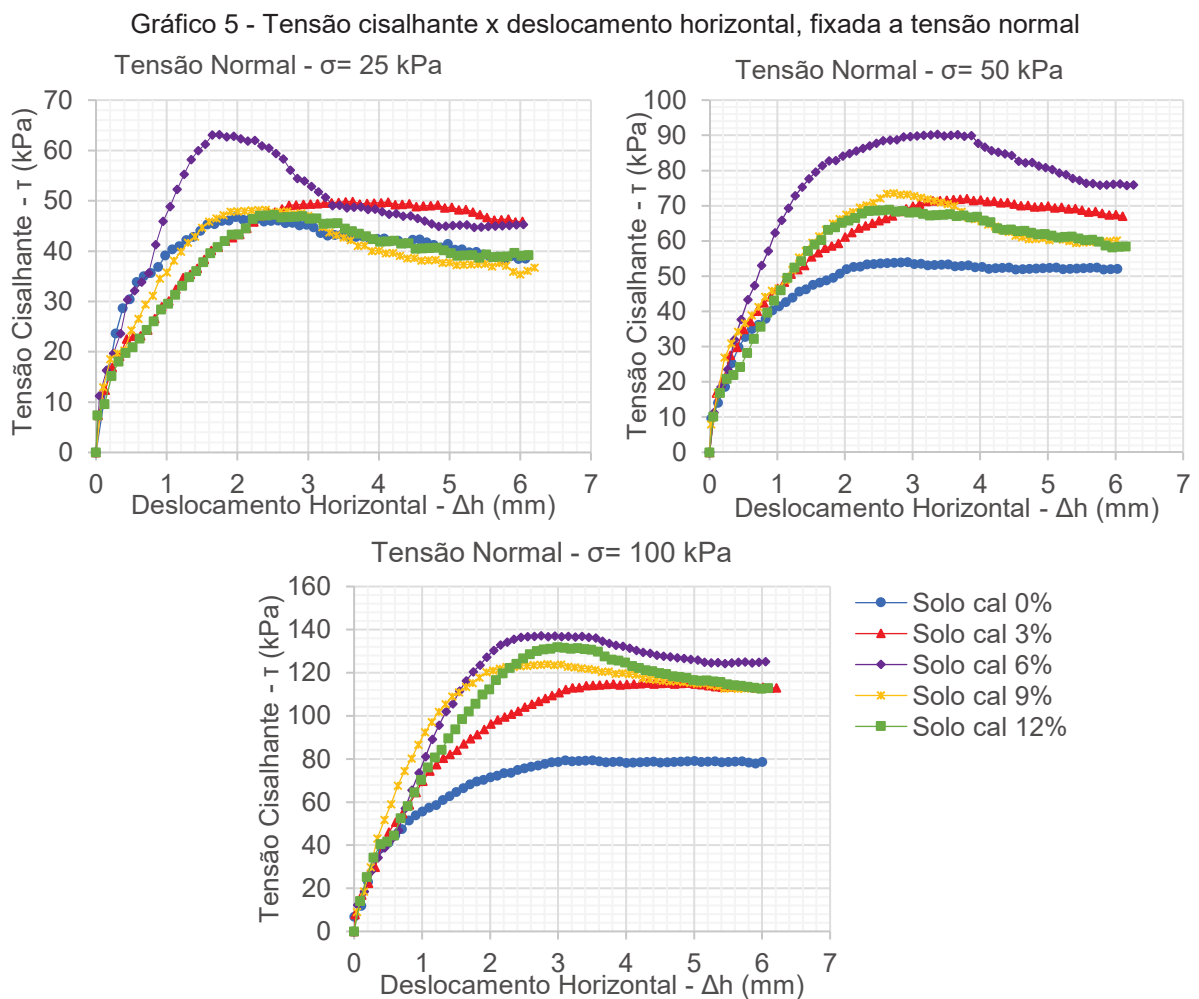
Fonte: Autoria própria (2019).

Na referida tabela, constata-se que não houve uma grande variação entre as umidades inicial e final dos corpos de prova ensaiados. Verifica-se também que as

umidades trabalhadas ficaram dentro da margem de $\pm 5\%$ estipulado anteriormente à realização dos ensaios.

4.2 Ensaio de cisalhamento direto

O Gráfico 5 permite avaliar a variação da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal, para cada proporção de solo, fixando-se a tensão normal aplicada.



Fonte: Autoria própria (2019).

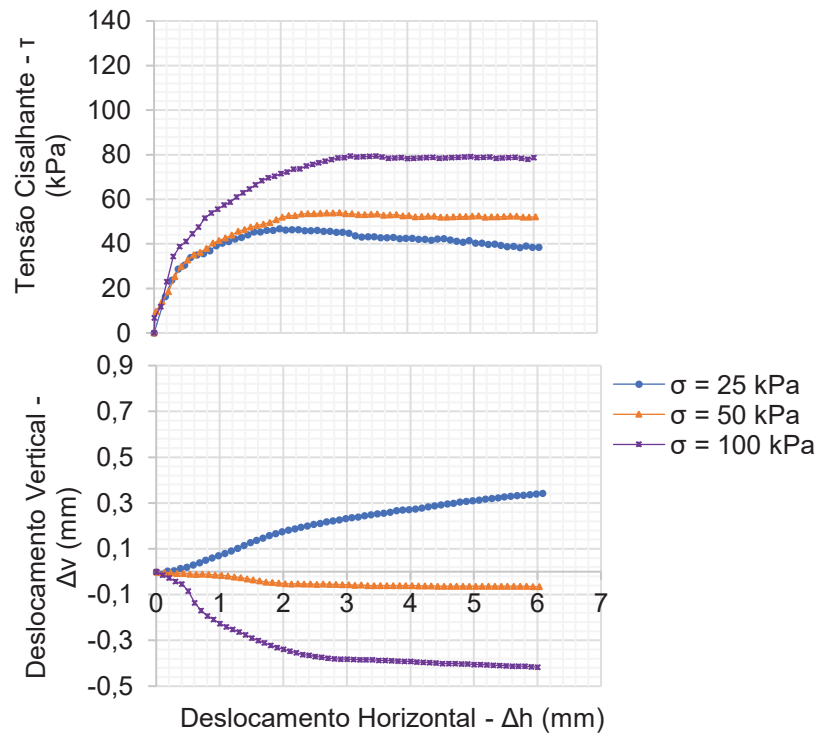
No Gráfico 5 nota-se que para os materiais estudados, qualquer que seja a tensão normal aplicada, o solo cal 6% apresentou maior a resistência na ruptura. Os valores máximos foram de 63 kPa, 90 kPa e 137 kPa para as tensões normais de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, respectivamente.

Os solos com adições de 0%, 3%, 9% e 12% de cal, para a tensão de 25 kPa, apresentaram resistências ao cisalhamento na ruptura da mesma ordem, a saber 48 kPa. Para as tensões de 50 kPa e 100 kPa, os solos tratados com 3%, 9% e 12%, a resistência mostrou-se superior ao de 0%.

Em relação as resistências residuais, para a tensão normal de 25 kPa, os solos 3% e 6% apresentaram maiores tensões, ambos da ordem de 46 kPa. Para as tensões normais de 50 kPa e 100 kPa, o solo 6% expressou resistências residuais mais acentuadas, cujos valores foram cerca de 76 kPa e 125 kPa respectivamente.

Os Gráficos 6, 7 e 8, apresentam a relação entre a tensão cisalhante e o deslocamento horizontal, bem como o deslocamento vertical por deslocamento horizontal (convencionada compressão como negativo e dilatância positivo) para um dado solo tratado. Nesses gráficos, as porcentagens de cal adicionada ao solo foram fixadas, de modo a permitir a análise do comportamento de destes materiais quando submetida à uma variação de tensão normal.

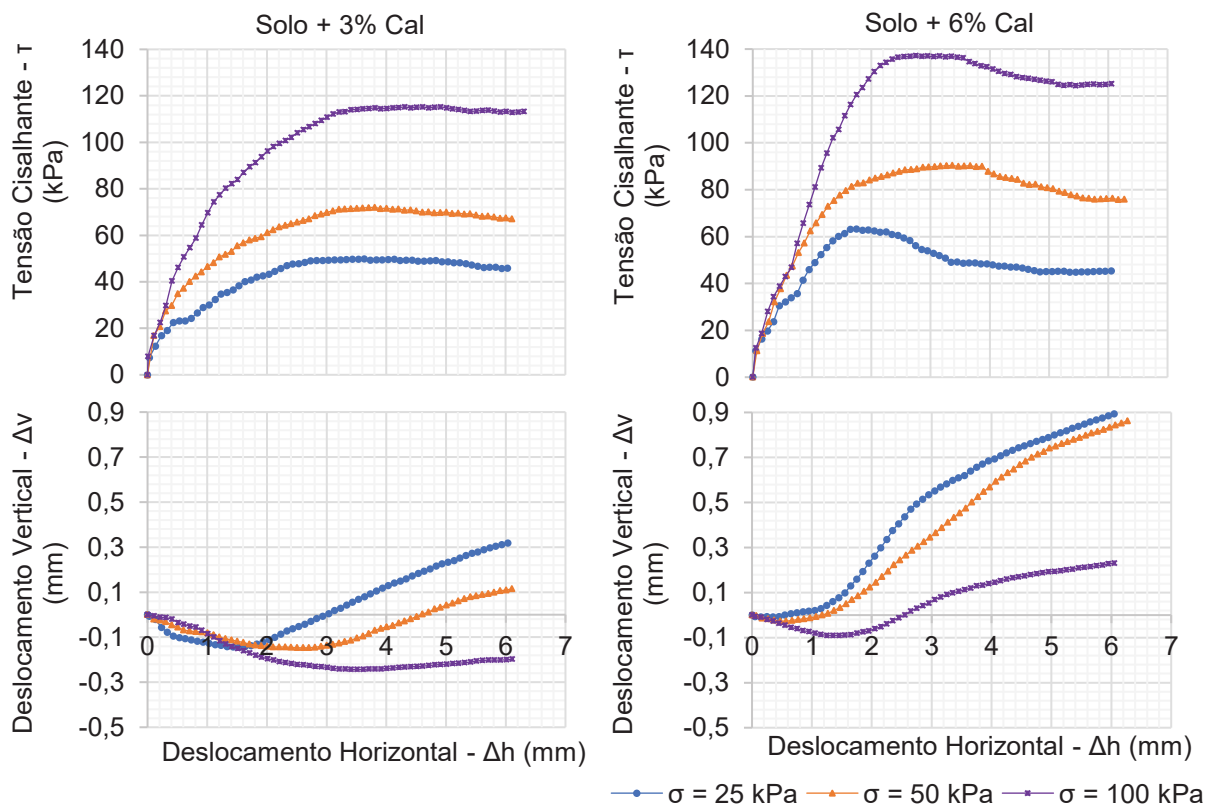
Gráfico 6 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais para solo 0%



No solo 0% cal (Gráfico 6), a partir da análise da resistência mecânica e da variação de volume, verifica-se que o referido material quando submetido às tensões normais de 25 kPa e 50 kPa apresentou um sobreadensamento pleno e um leve sobreadensamento respectivamente. Para a tensão de 25 kPa, a resistência de pico foi bem definida (47 kPa) quando comparada com as outras tensões normais. Observou-se também a expansão do solo com o aumento do deslocamento horizontal, na ruptura este valor foi de 0,176 mm. Na tensão de 50 kPa, a diferença entre as resistências de pico e residual foi sutil, atingindo 54 kPa na ruptura. No deslocamento vertical apresentou leve compressão, igual à 0,059 mm para a máxima resistência.

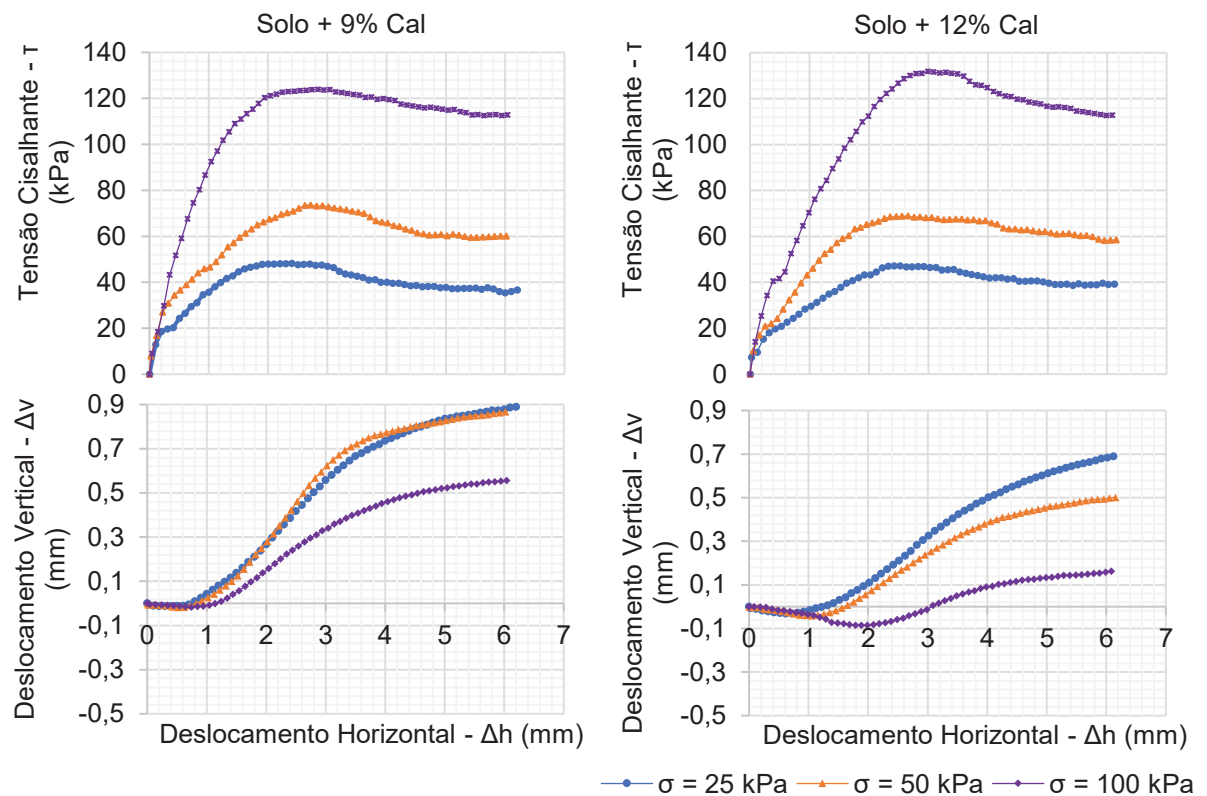
Já para a tensão de 100 kPa, esse solo mostrou-se normalmente adensado, com resistência máxima de 79 kPa e uma variação no deslocamento vertical de compressão acentuada, cujo valor na ruptura foi de 0,383 mm.

Gráfico 7 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 8 - Tensões cisalhantes e deslocamentos verticais em função dos deslocamentos horizontais



Fonte: Autoria própria (2019).

Nos Gráficos 7 e 8, observa-se um efeito de sobreadensamento provocado pela adição de cal no solo natural, ou seja, presença de resistência de pico e aumento de volume na ruptura. Porém, esse efeito não foi tão evidente para o solo 3%, na tensão normal de 100 kPa, cujas características foram de solo levemente sobreadensado. O comportamento mecânico durante o cisalhamento pôde ser verificado para todos os solos tratados, no qual observou-se o aumento da resistência ao cisalhamento e a menor expansibilidade na ruptura com o incremento de tensão normal. Com relação a variação de volume, destaca-se em particular, o solo 9% cal nas tensões de 25 kPa e 50 kPa, visto que as diferenças nas variações do deslocamento vertical foram sutis. No entanto, nota-se a tendência de menor expansão para 50 kPa.

A Tabela 3 a seguir, apresenta as resistências de pico e residual, bem como a diferença entre essas, e os deslocamentos vertical e horizontal para a condição de ruptura.

Tabela 3- Valores de resistências de ruptura e residual e deslocamentos horizontal e vertical

		Proporção de cal adicionada				
Tensão normal		0%	3%	6%	9%	12%
25 kPa	τ ruptura (kPa)	47	50	63	48	47
	τ residual (kPa)	39	46	45	37	39
	$\Delta\tau$ (kPa)	8	4	18	11	8
	Δh ruptura (mm)	1,979	3,632	1,747	2,402	2,520
	Δv ruptura (mm)	0,176	0,079	0,160	0,386	0,211
50 kPa	τ ruptura (kPa)	54	72	90	74	69
	τ residual (kPa)	52	67	76	60	58
	$\Delta\tau$ (kPa)	2	5	14	14	11
	Δh ruptura (mm)	2,929	3,805	3,368	2,722	2,655
	Δv ruptura (mm)	-0,056	-0,070	0,433	0,535	0,183
100 kPa	τ ruptura (kPa)	79	115	137	124	132
	τ residual (kPa)	79	112	125	113	113
	$\Delta\tau$ (kPa)	0	3	12	11	19
	Δh ruptura (mm)	3,105	4,911	2,751	2,842	2,987
	Δv ruptura (mm)	-0,383	-0,221	0,030	0,310	-0,013
Legenda:	τ - Resistência ao cisalhamento; Δh – Deslocamento horizontal; Δv – Deslocamento vertical; $\Delta\tau$ - τ ruptura - τ residual.					

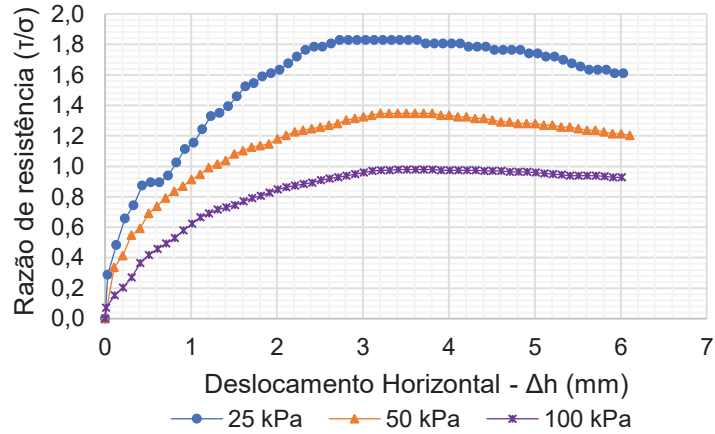
Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 3 observa-se, seja qual for a tensão normal aplicada, um aumento nas resistências na ruptura e residual com a adição de cal até a proporção de 6%, a partir daí, verifica-se uma tendência de diminuição dessas resistências para porcentagens superiores. Além disso, nota-se uma diferença entre as referidas resistências ($\Delta\tau$), cujo maior distanciamento ocorreu para o solo 6%.

Verifica-se ainda que, com exceção das proporções 0% e 3% nas tensões normais de 50 kPa e 100 kPa e 12% para 100 kPa, as rupturas ocorreram para deslocamentos verticais de expansão. Ademais, fixada a proporção solo cal, percebe-se uma tendência de aumento do deslocamento horizontal na ruptura para maiores tensões normais. Isto se deve pelo fato de que, para tensões normais maiores, as razões de sobreadensamento são menores, este efeito translada a curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal para a direita e para baixo, o que implica em deslocamentos horizontais maiores e em razões de resistência (τ/σ)

menores, o Gráfico 9 demonstra esse efeito. Destaca-se ainda, que os maiores valores do referido deslocamento ocorreram para o solo 3%.

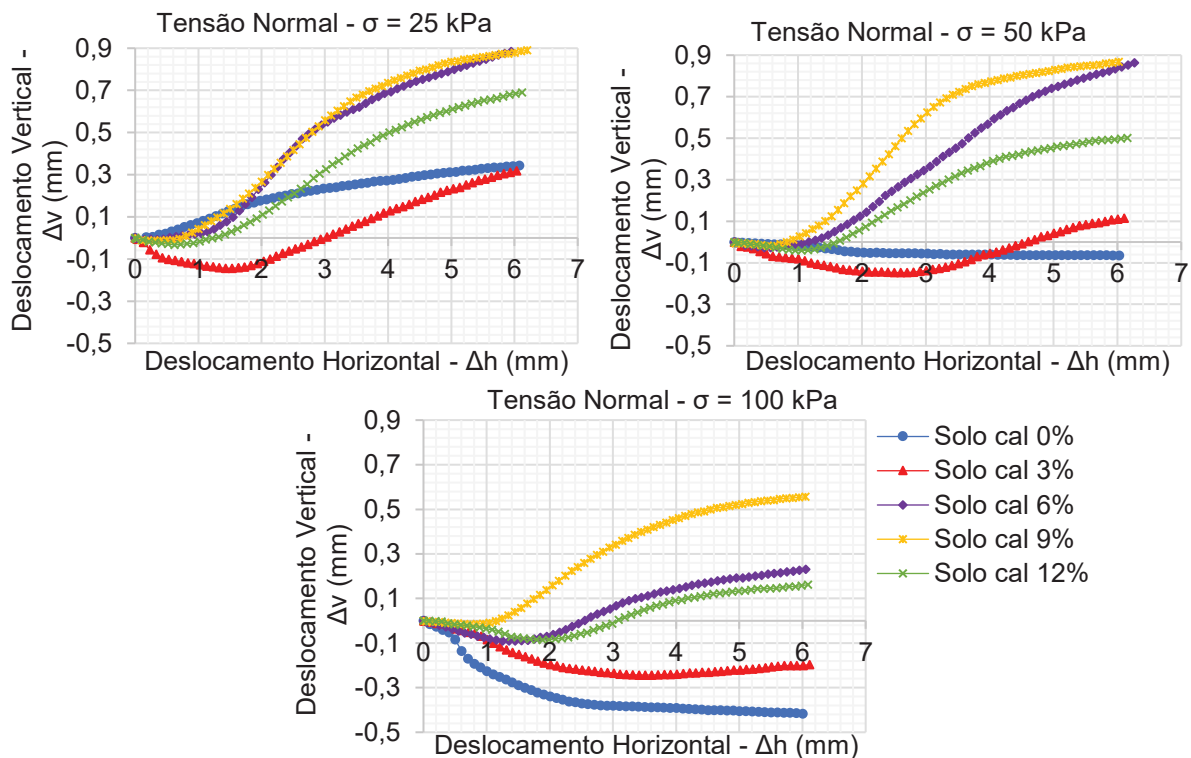
Gráfico 9 - Razão de resistência x deslocamento horizontal para solo cal 3%



Fonte: Autoria própria (2019).

O Gráfico 10 apresenta uma comparação entre as diferentes porcentagens de cal incrementada ao solo, para deslocamentos horizontal e vertical, fixando-se a tensão normal aplicada.

Gráfico 10 - Deslocamento horizontal x deslocamento vertical, variando percentual de cal

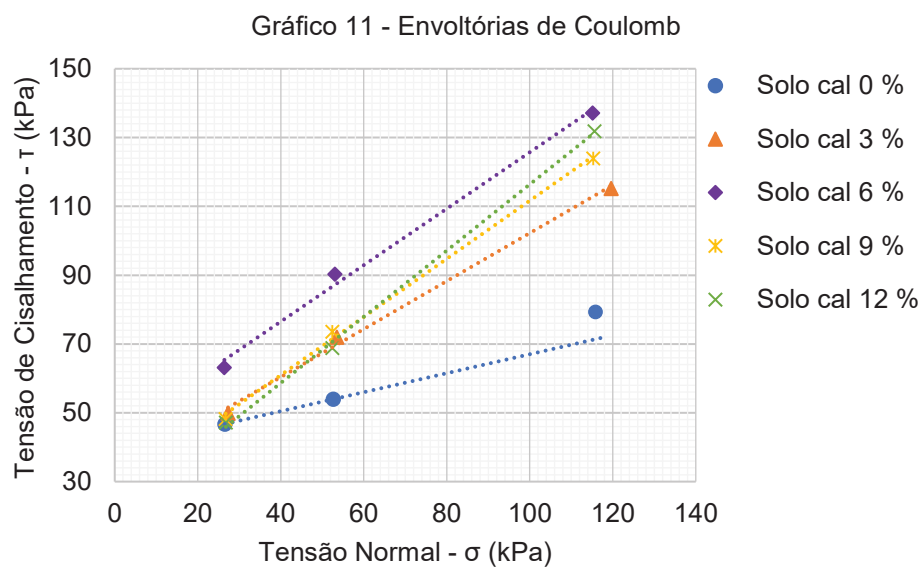


Fonte: Autoria própria (2019).

No referido Gráfico, nas proporções estudadas, verifica-se que o solo cal 9% em particular apresentou maior expansibilidade para todas as tensões normais.

O tratamento com cal proporcionou ao solo natural uma mudança de compressibilidade, fato este que fica mais evidente para a tensão de 100 kPa, o qual apresentou menores deslocamentos verticais de compressão e maiores de expansão.

O Gráfico 11 apresenta as envoltórias de resistência de Coulomb. A Tabela 4 apresenta o ângulo de atrito (φ) e a “coesão” do solo (c) para o solo analisado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 4 - Ângulo de atrito e coesão das misturas solo cal

	Ângulo de atrito interno (φ)	“Coesão” do solo (c)
Solo cal 0%	16°	39
Solo cal 3%	35°	35
Solo cal 6%	39°	44
Solo cal 9%	40°	27
Solo cal 12%	44°	20

Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa forma destaca-se que os solos tratados com cal apresentaram maior resistência ao cisalhamento quando comparado ao solo natural, dentre esses, os melhores resultados foram para a proporção de 6%. No Gráfico 11, observa-se que o ponto referente à resistência cisalhante para a tensão normal de 116 kPa não foi

usado na linearização da reta correspondente ao solo cal 0%, isso porque o solo apresentou característica de normalmente adensado. Este fato muda o comportamento do solo, fazendo a curva da envoltória apresentar uma inclinação mais acentuada, portanto, esse ponto foi excluído da análise da envoltória de Coulomb.

A Tabela 4 mostra o aumento do ângulo de atrito interno com o incremento da cal. Esse se deve ao fato de que a mistura solo cal deu origem à um material flocculado, de maior dimensão e mais arenoso. Os resultados obtidos por Leite (2018) relacionados a análise granulométrica, mostraram a redução gradual na porcentagem de material argiloso à medida que foi adicionada cal ao solo. Essa redução com consequente aumento da porcentagem de areia fina na mistura justifica os maiores ângulos de atrito interno nos solos tratados.

Para a “coesão”, observa-se uma tendência de redução desse parâmetro, com exceção do solo 6%, que apresentou um valor superior aos demais. Possivelmente, para essa porcentagem, ocorreu uma maior cimentação como consequência da estabilização do solo no decorrer do tempo. Essa deu origem à um material cimentício que se impregnou nas interfaces das partículas sólidas de argila e nos seus vazios, resultando no endurecimento global da mistura solo cal.

Desse modo, a maior resistência mecânica ocorreu para o solo tratado com 6% de cal hidratada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de análises laboratoriais foi possível verificar parâmetros físico e mecânico que são alterados com o uso da cal como aditivo, bem como a proporção de cal que apresentou resultado mais eficaz na função de melhoramento do solo.

Em relação aos parâmetros físicos, verificou-se que houve uma tendência de aumento no índice de vazios inicial, na ordem de 12% entre as proporções de 0% e 12% de cal, com exceção da de 6%, que apresentou o menor valor (0,86). Observou-se ainda que o grau de saturação do solo em geral foi alto, em torno de 95%, sendo o menor valor de 93% para o solo cal 6%.

As condições de compressibilidade demonstraram-se alteradas com o uso do aditivo no solo, que apresentou maior expansibilidade em relação ao estado natural, destacando-se nesse quesito o solo cal 9%. Além disso, para a tensão normal de 100 kPa, verificou-se que o solo passou de uma condição de normalmente adensado, no estado natural, para uma condição de sobreadensamento, naqueles com adição de cal.

As rupturas dos corpos de prova ocorreram para deslocamentos verticais de expansão, com exceção das proporções 0% e 3% nas tensões normais de 50 kPa e 100 kPa e 12% para 100 kPa.

Fixada a proporção de cal, observou-se uma tendência de aumento do deslocamento horizontal na ruptura para maiores tensões normais.

No tocante às propriedades mecânicas, notou-se que os ângulos de atrito aumentaram com o incremento da cal e a “coesão” diminuiu, excetuando-se para esse último a proporção de 6%.

A incorporação da cal ao solo elevou a resistência ao cisalhamento do mesmo de forma considerável, na qual destaca-se a porcentagem de 6%.

O uso da cal hidratada como aditivo mostrou-se ser um método eficaz para estabilização de um solo característico do município de Toledo-PR. Nesse sentido, a proporção de 6% revelou-se a mais indicada mecanicamente.

REFERÊNCIAS

AMADI, Agapitus. Evaluation of Changes in Index Properties of Lateritic Soil Stabilized with Fly Ash. **Leonardo Electronic Journal Of Practices And Technologies**, Nigéria, n. 17, p.69-78, 24 dez. 2010. Disponível em: <http://lejpt.academicdirect.org/A17/069_078.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidation drained conditions. Estados Unidos, 1998.

ARAGÃO, Maj Moniz de. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO II AGLOMERANTES: A** cal. 2013. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/cal.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de solo que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12023**: Solo Cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**: Volume 2. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 504 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: fundamentos: volume 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 234 p.

CASAGRANDE, Michéle dal Toé. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3349/000291907.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 28 set. 2018.

CASTELLÓ, Juan Diego Bauzá. **El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad.** 2015. 375 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidad de Sevilla, Sevilla- Espanha, 2015.

CHRUSCIAK, Mariana Ramos. **Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha.** 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília-UnB. Faculdade de Tecnologia, Brasília/df, 2013.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORRAL, F. Pacheco; JALALI, Said. **A Cal na Construção.** Guimarães- Portugal: Tecminho- Universidade de Minho, 2009. 132 p.

DAS, Braja M.. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica.** 6. ed. São Paulo - SP: Thomson, 2007. 562 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná:** MI - 504. 2007. Escala 1:250 000. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/339505/99/MI504.pdf>> Acesso em: 29 ago 2018.

FEUERHARMEL, Marcos Roberto. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2804/000326387.pdf;sequence=1>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

FIQUEROLA, Valentina. Alvenaria de solo-cimento. **Revista Técnica:** PINI, V. 85, p.30-36, abr. 2004. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/85/artigo286284-1.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

GHIDIN, André Ademir et al. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: I - mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.293-306, abr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832006000200010>. Acesso em: 28 ago. 2018.

GODOY, Helder de. **Identificação e classificação geotécnica de latossolos do Estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT.** 1997. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 1997. doi:10.11606/T.44.1997.tde-29102015-132258. Acesso em: 02 out. 2018.

GONÇALVES, Rafael Leite. **Estudo do comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível da região de Londrina/Pr.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina-UEL, Londrina/PR.

GUEDES, Saul Barbosa; COUTINHO, Roberto Quental; FONSECA, António Viana da. Critérios para determinar o teor em cimento no solo para uso como camada de pavimento. **Geotecnia**, Portugal, n. 134, p.127-146, jul. 2015.

GUTIERREZ, Nelcí Helena Masia. **Influência de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná**. 2005. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 2005.

INGLES, O.g.; MEFCALF, J. B.. **Soil stabilization: principles and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1973. 374 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de solos do Brasil**, 2001. Escala 1: 5 000 000. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/mapas/GEBIS%20-%20RJ/map6079.jpg>>. Acesso em: 01 set 2018.

Instituto de terras, cartografia e geologia do Paraná (ITCG-PR). **Solos: Estado do Paraná**. 2008. Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>>. Acesso em: 01 set 2018.

LEITE, Alexandre H. **Estudo da influência da cal hidratada nas propriedades físicas e na compactação do solo**. 2018. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - COECI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Toledo, 2018.

LICHT, Otávio A. B.. **Parque Nacional do Iguaçu**. [ca. 2000]. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=12>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

LIMA, D. C. et al. **Estabilização dos Solos II: Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p.

MARANGON, M.. **HIDRÁULICA DOS SOLOS**. 2018. Notas de aula, 29 f. Núcleo de Geotecnia-NuGeo, Faculdade de Engenharia-UFJF, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Cap%C3%ADtulo-01-Hidr%C3%A1ulica-dos-Solos.doc.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

Minerais do Paraná (Mineropar). **Atlas geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: 2001. Escalas variam. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>. Acesso em: 01 set 2018.

NEVES, Eduardo Nuno Sousa de Azevedo Castro. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal: modelos de comportamento**. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

OLIVEIRA, A. G. S.; JESUS, A.C.; MIRANDA, S.B.. **Estudo Geológico-Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano**. 2006. 6 f. Departamento de geotecnia, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos SP, 2006. Disponível em: <<http://www.geotecnia.ufba.br/arquivos/EGGAGS.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PRESS, Frank et al. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656 p.

RAMÍREZ, Gary Gary Durán. **Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de Pneus Inservíveis**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica-PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2012.

RESCHETTI JUNIOR, Paulo Roberto. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação**. 2008. 145f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 2009. doi:10.11606/D.18.2009.tde-23042009-152038. Acesso em: 02 out. 2018.

ROSA, Amanda Dalla. **Estudos dos parâmetros-chave no controle de resistência das misturas solo-cinza-cal**. 2009. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, Jorge Filipe Ribeiro dos. **Estudos de formulação de solo-cimento e solo-cal e respectivas aplicações**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto- Portugal, 2008.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, Campo Mourão, 2015.

SILVA, Cláudia Claumann da. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, 2007.

SILVA, Mariana Fernandes da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geológica (geotecnia), Departamento de Ciências da Terra, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa- Portugal, 2010.

TEODORO, Janice Mesquita. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 1999.