

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

ALEXANDRE HAAG LEITE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E NA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO-PR

2018

ALEXANDRE HAAG LEITE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E NA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr. Mauricio do Espírito Santo Andrade.

TOLEDO-PR

2018



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 149

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E NA COMPACTAÇÃO DO SOLO

por

Alexandre Haag Leite

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **09 de Novembro de 2018** 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**.

Profª Msc. Patrícia Cristina Steffen
(UTFPR – TD)

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

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

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus Pai por me dar as forças necessárias ao longo desta caminhada. Além disso, dedico-o a minha família que sempre me amparou e me incentivou tanto a ser uma pessoa quanto um profissional de valor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Santíssima Trindade por sempre me amparar nos percalços ao longo da graduação.

Agradeço a meus pais e minha irmã por estarem presentes ao longo de toda a graduação.

Agradeço aos meus amigos Amanda Donato, Angélica Cocco, Jeniffer Wurzius e Ermínia Malagodi pelos auxílios prestados ao longo deste trabalho.

Agradeço aos técnicos de laboratório de engenharia civil deste campus, Marcus e Wilson, pela presteza e auxílio ao longo da realização dos ensaios.

Agradeço a alguns professores que, ao longo do curso, se fizeram exemplo para mim, tanto quanto profissionais quanto como seres humanos.

Agradeço à minha coorientadora, professora Renathielly Fernanda da Silva, pela condução inicial deste trabalho, por estar sempre disposta a enriquecê-lo e sanar as minhas dúvidas.

Agradeço a meu orientador, professor Maurício do Espírito Santo Andrade, por aceitar o desafio de assumir a segunda etapa deste trabalho, obrigado pela paciência, pelas aulas e por todo o conhecimento agregado no desenvolvimento deste.

Agradeço a bibliotecária Carla Rech pela amizade e pelo auxílio na formatação final deste trabalho.

Agradeço a todos que não foram mencionados neste trabalho, mas que de alguma forma lhe agregaram valor.

Por último, mas não menos importante, agradeço a esta banca examinadora, tanto pelas orientações e sugestões quanto pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

RESUMO

Visto a frequente demanda por melhorias nas características do solo, analisou-se a influência da adição de cal hidratada em suas propriedades físicas, tendo o solo *in natura* como testemunho. Para tal, foram feitas dosagens com 0%, 3%, 6%, 9% e 12% de cal hidratada. Desse modo, realizaram-se os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, peso específico dos sólidos, sedimentação, peneiramento, compactação e expansão. Ainda, vale ressaltar que as classificações granulométricas foram realizadas tanto pela ABNT quanto pela AASHTO, a fim de obter uma maior aplicabilidade. Percebeu-se que, com os incrementos de cal hidratada, houve um aumento nos limites de plasticidade e uma redução nos limites de liquidez. Não obstante, o índice de plasticidade variou de 20 a 2 ao longo das dosagens. Ademais, houve um ganho no peso específico dos sólidos e, no ensaio de compactação, houve uma redução gradual do peso específico seco máximo, bem como um incremento na umidade ótima, de acordo com o acréscimo da fração de cal hidratada empregada. Ainda, avaliou-se que por se tratar de um solo predominantemente fino, este, segundo os critérios da AASHTO, não pode ser utilizado para a aplicação em subleitos. Contudo, no que diz respeito à expansão, o solo se mostrou favorável, visto que apresentou taxas inferiores a 1%, sendo que com um incremento de 3% de cal hidratada já foi possível inibir a sua expansão.

Palavras-chave: Melhoramento do solo. Solo-cal. Estabilização química.

ABSTRACT

Considering the frequent demand for improvements in soil characteristics, the influence of hydrated lime addition on its physical properties was analyzed, with the soil in natura as a reference. For this, dosages were made with 0%, 3%, 6%, 9% and 12% of hydrated lime. In this way, liquidity limit, plasticity limit, specific gravity of the solids, sedimentation, sieving, compaction and expansion tests were carried out. Still, it is worth mentioning that the classification parameters were performed by ABNT and AASHTO, in order to obtain a greater applicability. It was noticed that, with hydrated lime increases, there was an increase in plasticity limits and a reduction in liquidity limits. Nevertheless, the plasticity index ranged from 20 to 2 throughout the dosages. In addition, there was a gain in the specific weight of the solids and, in the compaction test, there was a gradual reduction of the maximum dry specific weight, as well as an increase in the optimal moisture, according to the addition of the hydrated lime fraction applied. Also, for being a predominantly fine soil, it was evaluated that, according to the AASHTO criteria, can not be used for the application in subgrades. However, with regard to the expansion, the soil was favorable, since it presented rates lower than 1%, and with a 3% increase in hydrated lime, it was already possible to inhibit its expansion.

Keywords: Soil improvement. Soil-lime. Chemical stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do solo do Paraná.....	18
Figura 2 – Compactação do solo melhorado com cal.	25
Figura 3 – Local de coleta da amostra.	28
Figura 4 – (a) Secagem do material; (b) Armazenamento do material.	30
Figura 5 – (a) Material em imersão; (b) Dispersão do material; (c) Provetas com o material.	31
Figura 6 – Agitação do material.	32
Figura 7 – Secagem do material para peneiramento fino.	32
Figura 8 – (a) Peneiras utilizadas; (b) Pesagem do material.	33
Figura 9 – Aparelho de Casagrande.....	34
Figura 10 – Referência e cilindro para limite de plasticidade.	34
Figura 11- Amostras imersas em água destilada.	35
Figura 12 – Balões volumétricos imersos em banho maria na chapa aquecida.	36
Figura 13 – Pesagem do balão volumétrico + solo + água.	36
Figura 14 – (a) Corpo de prova após compactação; (b) Extração do corpo de prova.....	38
Figura 15 – Compactação com cilindro grande; Aplainamento da amostra.	39
Figura 16 – Corpos de prova em imersão e com o extensômetro.....	40
Figura 17 – Classificação rodoviária (AASHTO).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativo de materiais	27
Tabela 2 – Comparativo das frações de solo entre ABNT e AASHTO.....	45
Tabela 3 – Avaliação do índice de plasticidade	48
Tabela 4 – Classificação do solo conforme o índice de plasticidade.....	48
Tabela 5 – Pesos específicos.	50
Tabela 6 – Classificação rodoviária.	53
Tabela 7 – Alturas dos corpos de prova.	54
Tabela 8 – Leituras e resultados dos ensaios de expansão.	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Solo passante x abertura da malha - AASHTO.....	42
Gráfico 2 – (a) Teor de silte x cal hidratada; (b) Teor de argila x cal hidratada.	43
Gráfico 3 – Solo passante x abertura da malha – ABNT.	44
Gráfico 4 – (a) Teor de areia x cal hidratada; (b) Teor de argila x cal hidratada.	45
Gráfico 5 – Limites de Plasticidade x cal hidratada.	46
Gráfico 6 – Umidade x número de golpes.....	47
Gráfico 7 – Limite de Liquidez x cal hidratada.....	47
Gráfico 8 – Índice de Plasticidade x cal hidratada.....	49
Gráfico 9 – Peso específico dos sólidos x cal hidratada.	50
Gráfico 10 – Peso específico aparente máximo x umidade.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CH	Cal hidratada
CNT	Confederação Nacional do Trânsito
DER/PR	Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE UNIDADES

cm ³	Centímetro cúbico
gf	Gramma força
gf/cm ³	Gramma força por centímetro cúbico
kgf	Quilograma força
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
pH	Potencial hidrogeniônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Justificativas	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Caracterização do solo.....	17
2.2	Técnicas de melhoramento do solo com aditivos	17
2.2.1	Estabilização com solo-cimento.....	19
2.2.2	Estabilização com resíduos da construção civil	19
2.2.3	Estabilização com geotêxtil	20
2.2.4	Estabilização com solo-brita	21
2.2.5	Estabilização com macadame hidráulico e macadame seco	21
2.2.6	Estabilização com solo-cal.....	22
2.3	Técnicas de estabilização mecânica.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	Dosagem	26
3.2	Quantitativos de material.....	26
3.3	Coleta e preparação da amostra	28
3.4	Análise granulométrica	30
3.4.1	Sedimentação	31
3.4.2	Peneiramento fino.....	33
3.5	Ensaio para a determinação dos Limites de Atterberg	33
3.6	Ensaio para a determinação do peso específico dos sólidos	35
3.7	Ensaio de compactação.....	37

3.8	Ensaio de penetração	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Caracterização granulométrica.....	41
4.2	Limites de atterberg	46
4.2.1	Limite de Plasticidade.....	46
4.2.2	Limite de Liquidez	46
4.2.3	Índice de Plasticidade	48
4.3	Peso Específico	49
4.4	Compactação	51
4.5	Classificação do solo segundo a AASHTO.....	52
4.6	Ensaio de Expansão	53
5	CONCLUSÃO	55
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

No que diz respeito ao Brasil, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) explicita que, dentre suas rodovias federais pavimentadas e os principais trechos estaduais, cerca de 60% estão em condições gerais que variam de ruim a péssima. Tal dado mostra que a qualidade da pavimentação asfáltica empregada deixa a desejar, sendo que, não obstante inadequações do material betuminoso e do controle tecnológico, a malha viária apresenta, por vezes, geometrias, preparação e composição das camadas subjacentes de solo de formas incompatíveis com suas condições de tráfego e de localidade, fato esse que compromete a estética e a estrutura da obra de pavimento ao longo do tempo (CNT, 2017).

Não obstante as rodovias, Milititsky (et al., 2005) mencionam que as estruturas de fundação podem vir a apresentar diversas patologias devido ao solo. Estas ocorrem muitas vezes devido a ausência ou a uma investigação do solo inadequada. Além disso, os autores citam que as patologias nas fundações são devidas a presença de argilominerais expansivos, solos com a capacidade de suporte inferior à demandada, controle inadequado da compactação do solo, dentre outros fatores.

Devido às problemáticas mencionadas, visto que o solo é a base da construção civil sob diversos aspectos, é de extrema necessidade que haja o estudo de seu melhoramento, sendo que a esta técnica dá-se o nome de estabilização. Lovato (2004) cita que o processo de estabilização promove um rearranjo das partículas do solo, melhorando suas propriedades e, conseqüentemente, proporcionando bom desempenho, sendo que o grau de estabilização do solo varia de acordo com sua finalidade.

Assim sendo, a fim de corrigir possíveis desvios na resistência demandada no solo, melhorando o seu aproveitamento para fins estruturais, a cal hidratada (CH) mostra-se como um aditivo a ser considerado. Conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003), cal hidratada consiste no pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

Deste modo, o estudo do melhoramento de solo é de grande relevância, pois através de ensaios laboratoriais normatizados, pode-se analisar o comportamento deste e avaliar se a cal propicia de fato alterações nas propriedades solo, avaliando prioritariamente sua densificação, bem como quais são as alterações físicas mais significativas.

1.1 Objetivos

Neste item é abordada a ideia central deste trabalho, bem como os resultados que se pretende alcançar ao longo da pesquisa de modo mais detalhado, a fim de propiciar uma melhor delimitação do tema.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da adição de percentuais de cal hidratada na compactação do solo em estudo.

1.1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral fosse alcançado e houvesse uma análise mais abrangente do material determinaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar fisicamente o solo em estudo;
- Realizar a classificação granulométrica de acordo com a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

1.2 Justificativas

Este tópico elucida as motivações para este trabalho dentro das diversas esferas de interesse do homem, sendo estas para o seu benefício próprio, bem como do meio em que vive.

Os ensaios de caracterização do solo são de suma importância no ramo da engenharia civil. Pinto (2006) cita que através destes pode-se estimar o provável comportamento do solo a uma solicitação ou ao menos orientar a investigação geotécnica para que cada caso possa ser analisado da maneira mais adequada. O autor cita ainda que existem diversas maneiras de classificar um solo, sendo por sua origem, evolução, estrutura, dentre outros. Uma vez de posse de tais parâmetros, Braja (2007) cita que se pode estimar o mineral predominante na amostra de solo, bem como o seu grau de plasticidade, essencial para a classificação dos finos.

Além disso, o uso da cal hidratada no melhoramento de solo é amplamente recomendável visto que, segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), o Brasil dispõe de abundância em tal matéria-prima, sendo o quinto maior produtor mundial da cal. Pode-se citar ainda que esta geralmente é obtida a custos inferiores em relação a outros materiais utilizados para tal finalidade. À exemplo disso, de acordo com o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (2018), em uma comparação de preços entre um cimento Portland CP II e a cal hidratada evidencia-se que aquele é 50% mais caro do que esta em relação a um quilograma força do material.

Não obstante, Guérios (2013) cita que a cal hidratada melhora a trabalhabilidade do solo, gerando uma mistura mais firme, coesa e capaz de suportar esforços superiores aos do solo *in natura*, gerando assim, conseqüentemente, um material mais resistente aos esforços mecânicos.

Dentre outros benefícios na utilização da cal no solo, Caires (et al., 2002) mencionam o processo de calagem, sendo que através deste insumo corrige-se o pH do solo, propiciando um melhor aproveitamento do solo para o desenvolvimento vegetal.

Ainda, Baldovino (et al., 2018) mencionam que o melhoramento de solo acarreta tanto em benefícios econômicos quanto ambientais visto que, por vezes, a substituição de solo, além de gerar custos com a sua movimentação, destina-o a aterros, fazendo assim que seja reduzida a vida útil destes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente tópico aborda algumas características do solo da região, bem como técnicas empregadas em seu melhoramento para a pavimentação, fundação e enfatiza as propriedades da cal hidratada e das reações químicas que ocorrem na mistura solo-cal propriamente ditas, objetivo principal deste trabalho.

2.1 Caracterização do solo

O solo do município de Toledo-PR é classificado através do Mapa Simplificado de Solos do Estado do Paraná, sendo este elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2012). A partir deste, pode-se identificar o solo da região como sendo um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2012), conforme a Figura 1.

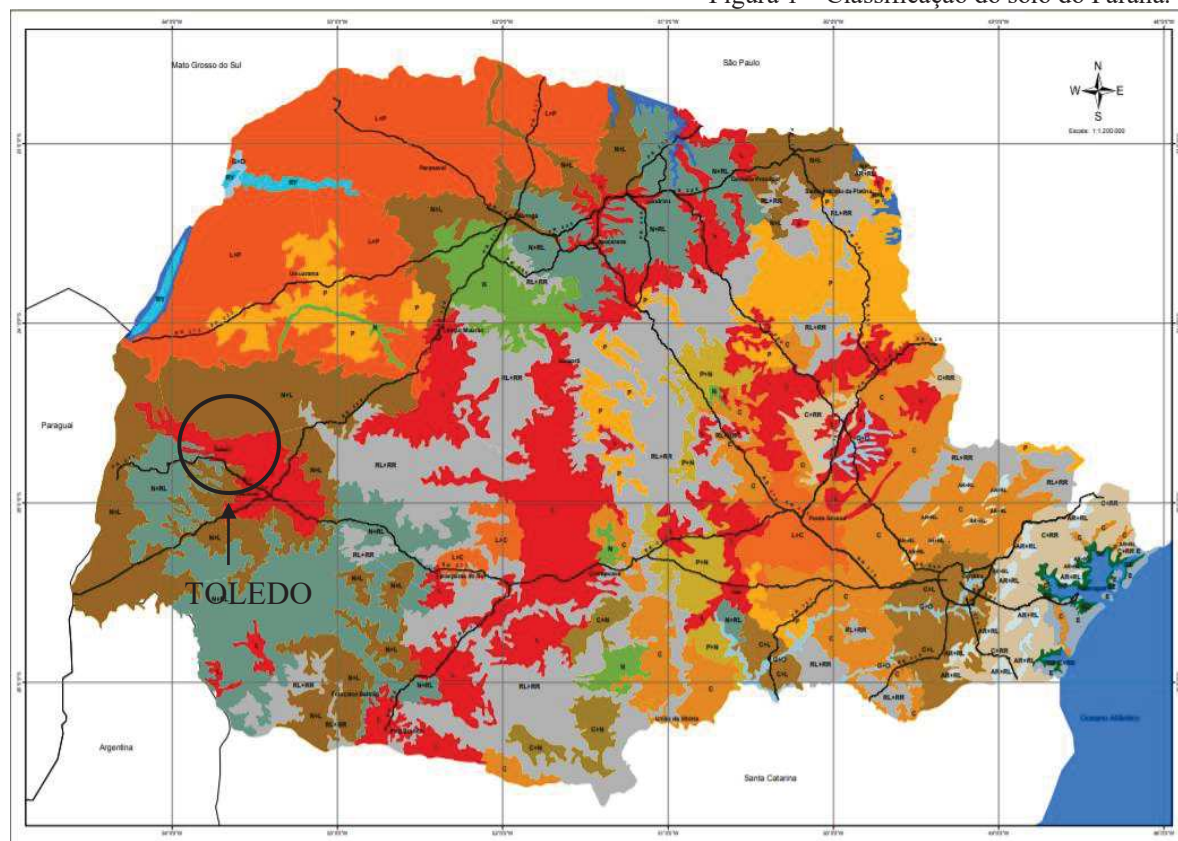
Ainda, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2007), os latossolos vermelhos costumam apresentar grande homogeneidade de características ao longo do perfil, boas taxas de drenagem, geralmente com profundidade superior a 50 cm e estrutura granular fina devido aos altos teores de argila. Além disso, sua coloração avermelhada é devida aos teores de ferro presentes em sua constituição, sendo sua origem proveniente de derrames basálticos (IBGE, 2007).

2.2 Técnicas de melhoramento do solo com aditivos

Segundo o exposto por Guimarães (1995), quando um solo não apresenta as características geotécnicas necessárias demandadas, especialmente no que diz respeito à sua resistência, este deve passar por um processo de melhoramento ou de substituição. Além disso, cada processo de melhoramento ou de substituição deve levar em conta não só os fatores técnicos, mas também os fatores econômicos para garantir sua viabilidade.

Ademais, Guérios (2013) cita que devido a grande importância do solo na construção civil, o melhoramento deste elemento é de extrema necessidade para aumentar a capacidade de carga suportada bem como, conseqüentemente, a eficiência e durabilidade das obras assentes a este. Diversos autores apontam que existem variadas técnicas de melhoramento que são aplicadas no solo, sendo estas dependentes da solicitação mecânica, constituição mineralógica do material, bem como da análise técnico-econômica de cada região. A seguir são apresentadas algumas delas.

Figura 1 – Classificação do solo do Paraná.



Legenda

Classificação

- AR+RL - AFLORAMENTOS DE ROCHAS + NEOSSOLOS LITÓLICOS
- G+O - GLEISSOLOS + ORGANOSSOLOS
- RY - NEOSSOLOS FLÚVICOS
- RL+RR - NEOSSOLOS LITÓLICOS + NEOSSOLOS REGOLÍTICOS
- E - ESPODOSSOLOS
- P - ARGISSOLOS
- P+N - ARGISSOLOS + NITOSSOLOS
- C - CAMBISSOLOS
- C+RR - CAMBISSOLOS + NEOSSOLOS REGOLÍTICOS
- C+L - CAMBISSOLOS + LATOSSOLOS
- C+N - CAMBISSOLOS + NITOSSOLOS
- L - LATOSSOLOS
- L+C - LATOSSOLOS + CAMBISSOLOS
- L+P - LATOSSOLOS + ARGISSOLOS
- N - NITOSSOLOS
- N+RL - NITOSSOLOS + NEOSSOLOS LITÓLICOS
- N+L - NITOSSOLOS + LATOSSOLOS
- GZ - GLEISSOLOS SÁLICOS
- Corpos de Água

Fonte: EMBRAPA et al. (2012), adaptado.

2.2.1 Estabilização com solo-cimento

De acordo com Bauer (2000), o solo-cimento é uma mistura bem graduada de solo com cimento Portland e água, de modo que ocorre uma estabilização entre os elementos. Assim sendo, melhoram-se as propriedades da mistura, sendo que a coesão entre os elementos é determinada pela constituição do cimento, sua finura, porcentagem de água e temperatura do ambiente.

Para fins de definição, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná faz distinções entre as misturas à base de cimento para o solo, sendo estas o solo-cimento e solo melhorado com cimento, sendo suas resistências à compressão superiores a 2,1 MPa e entre 1,2 e 2,1 MPa, respectivamente (DER/PR, 2005).

Almeida Filho (2008) define solo melhorado com cimento como a estrutura de solo que apresenta alterações em sua estrutura devido à interação com cimento. Porém, devido à baixa quantidade de material empregada, não apresenta resistência suficiente para ser empregado como reforço de pavimento.

Além destes, Marques (2006) cita o solo-cimento plástico. Este apresenta uma maior quantidade de cimento que o solo-cimento (cerca de 4%) e maior adição de água para deixar o material na consistência de argamassa, sendo este utilizado para o revestimento de valas, canais e taludes.

2.2.2 Estabilização com resíduos da construção civil

Conforme estudos de Pereira (2012), a obtenção de materiais não convencionais que atendam às exigências demandadas para a aplicação nas camadas do pavimento é árdua, tal qual o reaproveitamento dos resíduos da construção civil. Além disso, o autor cita que, por vezes, devido a distância de transporte para a obtenção dos materiais granulares, bem como a falta destes em algumas localidades, surge a necessidade de utilizar materiais tais quais os resíduos da construção civil de modo a melhorar a qualidade do produto final.

Carneiro (et al., 2001) realizaram um estudo de caso com rejeitos na cidade de Salvador. O agregado reciclado miúdo era constituído de areia grossa, média e fina, o agregado reciclado graúdo, por sua vez, era constituído de pedregulho. Os autores afirmam que, através de diferentes análises, tanto o material graúdo quanto o miúdo mostraram-se adequados para a execução de bases e sub-bases de pavimentos.

Estudou-se a inserção dos materiais em solo laterítico e saprolítico. No solo laterítico não houve ganho de resistência, conforme esperado pelos pesquisadores, mas no solo saprolítico, devido à sua baixa capacidade de suporte, houve incrementos consideráveis na resistência à compressão e significativa redução na expansão do solo com adição do material reciclado. Dessa maneira, o material reciclado mostrou-se capaz de estabilizar solos plásticos, assim como é o saprolítico (Carneiro et al., 2001).

2.2.3 Estabilização com geotêxtil

Segundo Carneiro (2009), os geotêxteis são materiais poliméricos (naturais ou artificiais) planos e permeáveis, sendo que, de acordo com o processo de fabricação, estes podem ser divididos em diferentes classes. Além disso, o geotêxtil possui ampla empregabilidade no reforço do solo, sendo que este se apresenta estruturado de acordo com sua finalidade de aplicação.

Susunaga (2015) realizou ensaios de carregamento cíclico com transdutores de pressão para a verificação do comportamento do solo sob diversos aspectos estruturais, bem como a alteração na pressão neutra e a migração dos finos para a base deste quando submetido à compactação. Os diferentes materiais geotêxteis foram empregados entre camadas de solo arenoso, sendo realizados testes com e sem compactação, e com e sem geotêxtil, de modo a obter um parâmetro para posterior comparação.

Nesta pesquisa, verificou-se que a presença de geotêxtil para a separação das camadas de solo resultou em uma melhor dissipação da poropressão gerada no subleito, devido aos carregamentos superficiais, minimizando assim a impregnação da brita por finos. Além disso, registraram-se menores recalques superficiais, visto que o geotêxtil reduziu a penetração de grãos de brita no solo do subleito. De um modo geral, constatou-se que os diferentes geotêxteis empregados apresentaram desempenhos semelhantes. Contudo, o material geotêxtil com maior gramatura obteve menor perda de resistência à tração após ser ensaiado com carregamentos cíclicos. Tais carregamentos cíclicos foram simulados através de um equipamento desenvolvido exclusivamente para a realização da pesquisa, conforme menciona a autora.

Vale ressaltar que, embora os resultados obtidos pela pesquisadora tenham se mostrado positivos, o material geotêxtil apresenta-se com custo elevado com relação a outras técnicas, de modo que, se aplicado em grande extensão, é oneroso.

2.2.4 Estabilização com solo-brita

Conforme Bernucci (et al., 2008) a brita graduada simples é um dos materiais comumente empregados para bases e sub-bases de pavimentos, tendo sua inserção na década de 1960, período este em que o Brasil teve uma expressiva expansão de sua malha rodoviária.

Ainda, segundo os mesmos autores, tal material consiste em uma distribuição granulométrica bem graduada, com teor de finos entre 3 a 9% e diâmetro máximo dos agregados não superior a 38 milímetros. Tais características são necessárias para garantir um bom intertravamento do material, bem como a adequada resistência.

Em adição, Bernucci (et al., 2008), afirmam que a brita graduada encontra-se na faixa de permeável a medianamente permeável, sendo que sua homogeneização ocorre em usinas, de modo a atender as normas vigentes. Para a sua aplicação, este é transportado através de caminhões basculantes, sendo distribuído usualmente por vibro acabadora ou moto niveladora. Após a deposição no material, deve-se efetuar a compactação o mais rápido possível para que não haja grandes perdas de umidade, sendo este processo feito com rolos de pneus ou rolos lisos, podendo contar com processo de vibração, de acordo com cada caso.

2.2.5 Estabilização com macadame hidráulico e macadame seco

Em consonância com Bernucci et al. (2008), sabe-se que o macadame se trata de um material granular, composto por agregados graúdos, sejam eles naturais ou britados, de modo que seus vazios são preenchidos por agregados miúdos e aglutinados com água, no caso do macadame hidráulico, sendo que sua estabilidade é obtida por ações mecânicas de compactação.

Além disso, conforme o DER/PR (2005), o material de enchimento é espalhado através de moto niveladora e compactado com, no máximo, duas passadas de rolo, sendo esse liso de três rodas ou vibratório. Logo após, é adicionado o material de enchimento, de modo que este respeite as especificações bem como a faixa granulométrica pré-estabelecida. Adiciona-se o material de enchimento e procede-se a compressão com vassouras manuais ou mecânicas a fim de preencher a maior quantidade de vazios possível. Após o preenchimento dos vazios adiciona-se água, no caso hidráulico, até que seja formada uma pasta, então ocorre uma nova compactação até a estabilidade da camada. O DER/PR (2005) cita, ainda, que a espessura de cada camada de macadame não deve ser inferior a 12 cm e nem superior a 20 cm.

Quanto à sua utilização e características, Bernucci (et al., 2008) explicam que a sua utilização ocorre, muitas vezes, em locais onde não há usinas para brita graduada simples e que, devido à sua granulometria e o modo como é processado, o macadame apresenta maior permeabilidade em relação as britas graduadas simples. Quando devidamente executado, este apresenta baixa deformabilidade e alta resistência.

2.2.6 Estabilização com solo-cal

Segundo Baldovino (et al., 2018), na engenharia civil existem várias técnicas que são utilizadas para o melhoramento das propriedades geotécnicas do solo, visto que a substituição de solo se torna um processo oneroso e ecologicamente inseguro. Além disso, não é preferível a estabilização com cimento tanto pelo custo, quanto pela preocupação ambiental devido ao seu processo produtivo. Ademais, os autores citam que a cal e seus derivados tem sido aplicados com sucesso no melhoramento de solos, especialmente em solos argilosos.

No que diz respeito aos processos químicos da interação solo-cal, de acordo com Neves (2009), a adição de cal a um solo dá início a uma série de reações entre os componentes, sendo tais reações responsáveis pela alteração de algumas características físicas do solo, tais como o teor de umidade, granulometria, plasticidade, dentre outras, que refletem diretamente na trabalhabilidade do material.

Além das reações chamadas de imediatas, o autor cita que ocorrem também ações em longo prazo, podendo estas ocorrer ao longo de meses e até de anos. Nesse sentido, Corrêa (2009) elucida que as reações imediatas referem-se à troca catiônica, floculação-aglomeração das partículas, compressão da dupla camada elétrica e adsorção de cal. Por sua vez, as etapas em longo prazo fazem menção às reações pozolânicas, que proporcionam o aumento da resistência, e à carbonatação, sendo os principais processos apresentados abaixo:

- Reações rápidas:

A troca catiônica é descrita por Neves (2009) como sendo a capacidade de íons, particularmente os cátions, que um mineral pode adsorver ou trocar. Além disso, Coelho et al. (2009) mencionam que, assim que a cal é adicionada ao solo, inicia-se o processo de troca catiônica, ocorrendo uma considerável redução da plasticidade, de modo que o solo se torna facilmente desagregável, inicialmente.

Por sua vez, a floculação ou aglomeração ocorre simultaneamente à troca catiônica, de modo que materiais coloidais, que estão em suspensão na água, são atraídos por gravidade e

consolidam-se entre si, reduzindo significativamente propriedades como a coesão e a expansibilidade, mas aumentando a sua trabalhabilidade, conforme descrito por Coelho et al. (2009). Ainda, segundo Corrêa (2009), a flocculação e aglomeração geram uma aparente mudança da textura das partículas de argila, resultando em um solo mais grosseiro e friável.

- Reações lentas:

Conforme Coelho (et al., 2009), a ação de cimentação provocada pelos materiais pozolânicos é uma das principais responsáveis pela ação da cal em longo prazo no processo de estabilização do solo.

O exposto acima se justifica devido ao fato de que, conforme Corrêa (2009), as pozolanas são materiais que quando em contato com a água propiciam a geração de compostos hidratados com propriedades ligantes entre o solo e a cal, aumentando a coesão e consequentemente a resistência deste composto. Ainda, a autora explica que mesmo o solo não sendo um material propriamente dito pozolânico, este pode conter frações ideais de argila que apresentem esta peculiaridade.

Além disso, Corrêa (2009) elucida que a liberação das propriedades pozolânicas inicia-se após a adição de cal, pois o pH do solo eleva-se de 4,5 a 6,5 para o intervalo de 11,0 a 12,0 e, através de tais condições de alcalinidade, propicia-se a reação do solo com o aditivo.

Tal reação, em consonância com Azevêdo (2010), além de promover incrementos na resistência do solo, também ocasiona maior resistência à ação da água, seja esta por gravidade ou capilaridade. Vale ressaltar que o composto solo-cal não se torna impermeável, contudo a passagem de água se dará de forma mais lenta, gerando menos danos em relação ao efeito erosivo da água no solo.

No que diz respeito à carbonatação, Azevêdo (2010) expõe que tal processo refere-se à reação entre a cal e o dióxido de carbono presente no ar, formando agentes cimentantes mais frágeis, sendo estes compostos de carbonato de cálcio e magnésio. No que diz respeito à cal hidratada, a carbonatação é regida pela Equação 1:



A fim de evitar a propagação desta reação para que haja menor interferência possível na atuação da pozolana, Azevêdo (2010) cita que se deve realizar a correta imprimação da camada em campo, reduzindo assim o contato direto com o dióxido de carbono. Vale ressaltar que, segundo o levantado pelo autor, no que diz respeito à estabilização do solo para

pavimentação, esta reação torna-se secundária, visto que a camada de solo será recoberta pelo pavimento, estando assim menos exposta ao dióxido de carbono, diferentemente de vias não pavimentadas.

2.3 Técnicas de estabilização mecânica

De acordo com Bernucci (et al., 2008), dentro da área de atuação da engenharia civil, pode-se citar o processo de compactação na preparação de bases e sub-bases para pavimentação, contenção de taludes, regularização de camadas de aterro sanitário, preparação de superfícies para o recebimento de estruturas em geral, barragens de terra, dentre outros.

Visto sua recorrência nas obras de terra, a compactação dos solos é um importante instrumento de caracterização e verificação das propriedades deste. Conforme o estabelecido por Pinto (2006), este processo consiste na densificação mecânica do solo, de modo a aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo. Com tal ação reduz-se os índices de vazios do solo e, conseqüentemente, aumenta-se sua resistência à compressão.

A compactação do solo (Figura 2) é facilitada com a adição de água, devido ao fato de que esta aumenta a sua densidade, pois a água auxilia no deslocamento das partículas de finos para o preenchimento dos vazios no fundo das camadas de solo. Contudo, Braja (2007) elucida que a partir de certo teor de umidade, em que a água ocupa o lugar que deveria pertencer às partículas sólidas, começa-se a reduzir a densidade do solo e prejudicar a sua aplicação. Tal umidade limite, que apresenta o peso específico aparente seco máximo, é definida como sendo a umidade ótima.

Desse modo, o ensaio de compactação de Proctor busca obter a umidade ótima para certa energia de compactação e, por conseguinte, o seu peso específico aparente seco máximo, estando normatizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016).

Ainda, conforme Pinto (2006) para obter-se o efeito desejado da compactação sobre o solo deve-se atentar para, durante os ensaios, aplicar a energia de compactação que corresponda adequadamente ao maquinário a ser empregada em campo. Não obstante, o autor menciona que se deve atentar tanto para o número de camadas quanto à espessura dessas, visto que camadas com espessuras superiores às estabelecidas não serão capazes de distribuir a energia de compactação adequadamente e, assim sendo, haverá uma compactação inadequada, não atingindo em campo o grau de compactação mínimo, tampouco a qualidade desejada.

Figura 2 – Compactação do solo melhorado com cal.



Fonte: Wirtgen group (2018).

Além disso, a fim de exemplificar sua relevância, pode-se citar que, segundo Caputo (1988), a compactação em campo acontece com o uso de diversos equipamentos, sendo os valores de umidade e densidade obtidos experimentalmente aplicados na prática. Tal processo ocorre com a utilização de rolos lisos, vibratórios, pés de carneiro, pneumáticos ou mistos, de acordo com sua finalidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção abordará quais foram os materiais, bem como as quantidades de solo, cal e as metodologias empregadas para a realização dos ensaios. Não obstante, há uma breve descrição dos mesmos.

3.1 Dosagem

De acordo com Senço (2001), estudos na Alemanha apontam que a dosagem recomendada de cal hidratada para solos plásticos situa-se entre 5 a 9%. Por sua vez, Guérios (2013) obteve em sua pesquisa melhoras significativas nas propriedades do solo plástico com a adição de 10% de cal hidratada, sendo que valores inferiores apresentaram resultados insignificantes.

Assim sendo, visto a particularidade do solo de cada região e levando-se em conta os valores obtidos em diversas literaturas, optou-se por realizar dosagens mais abrangentes, sendo estas entre os intervalos de 3 a 12%, variando 3% entre si, tendo como testemunho a dosagem de solo com 0% de cal hidratada.

3.2 Quantitativos de material

Os quantitativos de material, bem como as metodologias empregadas para a realização de cada ensaio, foram balizados nas normativas expressas no Quadro 1.

Para o ensaio de peneiramento, visto que por análise visual determinou-se que os maiores diâmetros dos grãos de solo são inferiores a 5 mm, tomou-se cerca de 1 kgf de solo. Por sua vez, para os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade utilizou-se cerca de 150 gf, já para o ensaio de sedimentação utilizou-se cerca de 70 gf de solo. Além disso, para o ensaio de peso específico utilizou-se cerca de 40 gf de solo.

Não obstante, para o ensaio de compactação, como o ensaio é sem reuso de material, com a amostra passando integralmente na peneira de 4,8 mm e com a utilização de cilindro pequeno, foram necessários aproximadamente 10,5 kgf de solo. Ademais, para o ensaio de expansão, utilizou-se cerca de 5 kgf de solo para o ensaio, no entanto este foi realizado com reuso de solo oriundo do ensaio de compactação com energia normal, não sendo contabilizado no total necessário.

Desse modo, através da quantia necessária para realizar-se todos os ensaios, evidencia-se que para uma dosagem a 0% de cal hidratada necessitou-se de cerca de 12 kgf de solo para a realização destes.

Quadro 1 – Normas utilizadas.

NBR 6457 (2016)	Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
NBR 6458 (2016)	Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.
NBR 6459 (2017)	Solo – Determinação do limite de liquidez.
NBR 7180 (2016)	Determinação do limite de plasticidade.
NBR 7181 (2016)	Solo – Análise granulométrica.
NBR 7182 (2016)	Ensaio de compactação.
DNIT 172/2016 ME	Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.

Fontes: ABNT (2016 e 2017), DNIT (2016).

No que diz respeito à cal hidratada, as suas porcentagens foram incorporadas em todos os processos ensaiados, excetuando-se a amostragem a 0%. Assim sendo, as porcentagens em peso foram, em geral, decrescidas do valor de 12 kgf de solo e foram substituídas pela cal hidratada, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Quantitativo de materiais

Amostra	Solo (kgf)	Cal (kgf)
CH a 0%	12,00	0,00
CH a 3%	11,64	0,36
CH a 6%	11,28	0,72
CH a 9%	10,92	1,08
CH a 12%	10,56	1,44
Total	56,40	3,60

Fonte: O autor.

Através da Tabela 1 se percebe que foram necessários cerca de 56 kgf de solo e 4 kgf de cal hidratada para a realização dos ensaios. Ainda, vale ressaltar que tais valores não

previram a incorporação de água, sendo que esta varia de acordo com as precipitações e as condições a que o solo estava inserido no período da coleta. Desse modo, o valor de solo estimado faz referência ao solo nas umidades consideradas em cada normativa, sendo que o valor coletado em campo foi de aproximadamente 78 kgf, sendo então superior ao estimado devido à quantidade de água incorporada à amostra.

3.3 Coleta e preparação da amostra

O material utilizado para a realização dos ensaios foi obtido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, com prévia autorização pelo engenheiro do campus, com auxílio de pá, picareta e carriola, de modo a preservar a umidade natural do solo e reduzir a quantidade de impurezas na amostra. O local tem como coordenadas geográficas S 24° 44' 003'' e W 53° 45' 883'' Figura 3, tais dados foram levantados através do GPS *Etrex Legend Garmin*, com precisão de 10 m.

Figura 3 – Local de coleta da amostra.



Fonte: Google Earth (2018).

Previamente à coleta, removeu-se a camada vegetal do solo, até uma profundidade de aproximadamente 50 cm de profundidade, de modo a preservar a umidade natural do solo e reduzir a quantidade de impurezas na amostra.

A fim de determinar a umidade um modo geral, se coletou três amostras deformadas do material em cada etapa, sendo estas colocadas em cápsulas metálicas para pesagem, de

modo que o peso de cada cápsula foi tomado previamente. Logo após, colocou-se as cápsulas em uma bandeja metálica e levou-as à estufa para constância de massa, por um período mínimo de 24 horas. Assim sendo, obtiveram-se os pesos do solo seco e a umidade do solo, sendo esta obtida pela Equação 2:

$$w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \quad (2)$$

Onde:

w = umidade (%);

P_w = peso úmido do solo (gf);

P_s = peso seco do solo (gf).

Obteve-se a umidade natural do solo e, após um processo de secagem natural ao ar, obteve-se sua umidade higroscópica. O controle de umidade foi realizado ao longo de todo o processo, de modo que a amostra foi adequada de acordo com a necessidade de cada experimentação.

Após a determinação da umidade natural, parte do material foi armazenado em sacos devidamente estanques ao ar e parte do material foi disposta em lona plástica para que atingissem a umidade higroscópica (Figura 4-a). Para tal, realizando um peneiramento preliminar com o auxílio da peneira de 4,8mm, o material passante foi ensacado (Figura 4-b) e o material retido ficou exposto para secagem natural ao ar e posterior destorroamento dos grãos.

Tal metodologia justifica-se devido ao fato de que para a realização do ensaio de compactação são necessárias amostras de solo passantes na peneira de 4,8 mm. Desse modo, visto que se optou por realizar o ensaio com a umidade a cerca de 5% da umidade ótima presumível, considerou-se mais viável deixar o solo secar até tal umidade do que secá-lo até a umidade higroscópica e hidratá-lo novamente, propiciando assim maior uniformidade na umidade da amostra.

Portanto, próximo à realização do ensaio este material foi exposto ao ar até atingir o valor de umidade requerida, sendo esta pré-determinada através do ensaio de limite de plasticidade.

Figura 4 – (a) Secagem do material; (b) Armazenamento do material.



Fonte: O autor.

Após a deposição do material previamente seco ao ar no almofariz ocorreu, gradativamente, o seu destorroado com o auxílio da mão de gral. Desse modo, para o destorroamento, foram exercidos movimentos circulares, a fim de desagregar os grãos, mas sem quebrá-los para não haver descaracterização da amostra.

3.4 Análise granulométrica

Através do ensaio de granulometria foi possível traçar as curvas granulométricas e analisar as porcentagens de argila, silte, areia e pedregulho em relação à amostra total ensaiada. Para que tais análises fossem possíveis, traçou-se as curvas granulométricas tanto através das classificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) quanto da *Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. Tal fato deve-se a esta ser utilizada para pavimentos e aquela para fundações, dentre outras aplicações, de modo a obter classificações mais abrangentes.

A caracterização granulométrica foi realizada através de peneiramento fino (por intermédio das peneiras da série normal) e do ensaio de sedimentação, visto que não houve material retido nas peneiras correspondentes ao peneiramento grosso.

Ainda, a fim de avaliar a aplicabilidade do material para a utilização de subleito, segundo a classificação da AASHTO, procedeu-se ao cálculo do índice de grupo (IG) conforme a Equação 3:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (3)$$

Onde:

$$a = p-35 \quad (35 \leq P \leq 75);$$

$$b = p-15 \quad (15 \leq P \leq 55);$$

$$c = LL-40 \quad (40 \leq LL \leq 60);$$

$$d = IP-10 \quad (10 \leq IP \leq 30);$$

p = porcentagem de material passante na peneira nº 200.

Quando os valores extrapolaram os parâmetros estabelecidos adotaram-se os valores limitantes. Ainda, o valor do IG foi aproximado para o próximo número inteiro.

3.4.1 Sedimentação

Adicionou-se cerca de 125 mL de hexametáfosfato de sódio para agir como defloculante no material, cerca de 70 gf, este ficou ainda em repouso por no mínimo 12 horas (Figura 5-a).

Figura 5 – (a) Material em imersão; (b) Dispersão do material; (c) Provetas com o material.



Fonte: O autor.

Logo após, foi submetido à dispersão mecânica (Figura 5-b) sendo, em seguida, colocado em uma proveta de 1000 mL onde o restante de seu volume foi completado com água destilada para então dar-se início às leituras com o densímetro e o termômetro (Figura 5-c). O densímetro, enquanto não estava sendo utilizado, ficou em repouso em outra proveta com água destilada para não interferir na sedimentação, juntamente com o termômetro.

Além disso, vale ressaltar que as leituras só tiveram início após a agitação do material, sendo que estas foram realizadas três vezes para obter as leituras dos tempos dentre 0,5 a 2 minutos, de modo a evitar erros de leitura (Figura 6).

Figura 6 – Agitação do material.



Fonte: O autor.

Após as leituras, o material foi vertido na peneira de 0,075 mm e submetido ao processo de lavagem até que não passasse mais material pela peneira (Figura 7).

Figura 7 – Secagem do material para peneiramento fino.



Fonte: O autor.

Este foi submetido ao processo de secagem natural, tendo sido tomada a tara de cada peneira previamente a fim de determinar o peso total úmido. Em seguida, o material foi posto para a secagem natural para que, ao transferi-lo para cápsulas metálicas e determinar sua umidade, houvesse a menor perda de grão possível devido à aderência do material úmido nas peneiras. Então, este foi levado à estufa para secagem, pesagem e realização do peneiramento fino.

3.4.2 Peneiramento fino

Para a análise granulométrica, no que diz respeito ao peneiramento fino, o solo foi ensaiado através de peneiras normatizadas (Figura 8-a), separado em bandejas metálicas e seus pesos foram tomados através de balança para determinação da expressividade em relação à amostra (Figura 8-b).

Figura 8 – (a) Peneiras utilizadas; (b) Pesagem do material.



Fonte: O autor.

3.5 Ensaio para a determinação dos Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg referem-se aos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e a diferença entre estes, o índice de plasticidade (IP).

O Limite de Liquidez foi determinado ao obter-se a umidade necessária para que, com 25 golpes, fosse fechada a ranhura aberta com cinzel no Aparelho de Casagrande (Figura 9).

Figura 9 – Aparelho de Casagrande



Fonte: O autor.

Visto a dificuldade para obter com exatidão os 25 golpes, utilizaram-se ao menos cinco pontos entre 15 e 35 golpes para traçar a curva de fluidez em um gráfico, onde o número de golpes foi plotado nas abscissas em escala logarítmica e a umidade nas ordenadas, em escala aritmética.

Por sua vez, para o ensaio de limite de plasticidade realizou-se, através de movimentos manuais circulares, a moldagem de cilindros de aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sobre uma placa de vidro esmerilhado, sendo as umidades da amostra determinadas quando os cilindros se fragmentaram ao atingir tais dimensões (Figura 10).

Figura 10 – Referência e cilindro para limite de plasticidade.



Fonte: O autor.

Após a fragmentação as amostras foram pesadas, secas em estufas e pesadas novamente para a obtenção de sua umidade. Desse modo, como os valores obtidos não diferiram mais que 5% da média, não houveram pontos descartados, sendo o valor médio o LP.

3.6 Ensaio para a determinação do peso específico dos sólidos

Para o ensaio de peso específico dos sólidos as amostras, cerca de aproximadamente 40 gf (P₁) para cada dosagem, foram submetidas à imersão em água destilada por no mínimo 24 horas, de modo que o material foi homogeneizado e ficou totalmente recoberto (Figura 11).

Figura 11- Amostras imersas em água destilada.



Fonte: O autor.

Logo após o material foi disperso no copo metálico com chicanas, sendo este preenchido com água destilada até a metade, por no mínimo 15 minutos. Então, com o auxílio de um frasco de água destilada, o material foi transferido do copo metálico para o balão volumétrico, de modo a atentar-se para não haver perda do material.

Em seguida, completou-se o balão volumétrico com água destilada até a base do gargalo e submeteu-se este à bomba de vácuo por no mínimo 20 minutos.

Ademais, evidenciando que o processo de vácuo não havia eliminado todas as bolhas presentes no material este foi submetido ao processo de banho maria em chapa aquecida por no mínimo mais 20 minutos ou até que as bolhas houvessem sido eliminadas o máximo possível (Figura 12).

Figura 12 – Balões volumétricos imersos em banho maria na chapa aquecida.



Fonte: O autor.

Por conseguinte, após a eliminação das bolhas e estabilização do material à temperatura ambiente, completou-se com água destilada até a marca de referência para calibração do balão volumétrico, limpou-se o excesso de água dentro do gargalo e pesou-se o conjunto balão volumétrico + solo + água (P_2) (Figura 13).

Figura 13 – Pesagem do balão volumétrico + solo + água.



Fonte: O autor.

A seguir, através das curvas de calibração do balão volumétrico, determinou-se M_3 . Desse modo, pode-se calcular o peso específico através da Equação 4:

$$\gamma_s = \frac{P_1 \cdot \frac{100}{100+w}}{[P_1 \cdot \frac{100}{100+w}] + P_3 - P_2} \cdot \gamma_{w(T)} \quad (4)$$

Onde:

γ_s = peso específico dos grãos de solo (gf/cm^3);

P_1 = massa úmida do solo (gf);

P_2 = massa do balão volumétrico + solo + água, à temperatura T do ensaio (gf);

P_3 = massa do balão volumétrico cheio de água até a marca de referência (gf);

w = umidade da amostra (%);

$\gamma_{w(t)}$ = peso específico da água, à temperatura T do ensaio (gf/cm^3).

3.7 Ensaio de compactação

As amostras contendo cal hidratada foram dosadas 2 dias antes da realização do ensaio, sendo este período justificado devido à necessidade de homogeneização da amostra, visto que o aditivo influenciou na umidade inicial, necessitando-se esta ser recalculada e corrigida para os intervalos de interesse. Além disso, o ensaio, conforme mencionado, foi realizado com as amostras a cerca de 5 % da umidade ótima presumível, sendo esta estimada através do LP. Ainda, a compactação foi realizada com Proctor Normal, consistindo de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra.

Após o processo de homogeneização, a amostra foi compactada no molde cilíndrico em 3 camadas aproximadamente iguais, sendo a superfície de cada uma delas escarificada após cada compactação para receber a próxima camada. Ademais, para cada camada, aplicaram-se 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície do cilindro, sendo estes através do soquete pequeno, caindo de aproximadamente 30,5 cm de altura.

Em seguida, removeu-se o colarinho e a base do cilindro (Figura 14-a), aplainando-se a superfície do material à altura do molde e pesando-se o conjunto do cilindro com o solo úmido compactado. Não obstante, retirou-se a amostra do molde com auxílio do extrator (Figura 14-b) e, partindo-a ao meio, coletou-se uma pequena quantidade do material para a

determinação da umidade. Ademais, para a obtenção do volume de cada cilindro, utilizou-se um paquímetro.

Figura 14 – (a) Corpo de prova após compactação; (b) Extração do corpo de prova.



Fonte: O autor.

Após a obtenção dos dados determinou-se o peso específico aparente seco (γ_d) através da Equação 5:

$$\gamma_d = \frac{P_u \cdot 100}{V \cdot (100 + w)} \quad (5)$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco (gf/cm^3);

P_u = massa úmida do solo compactado (gf);

V = volume útil do molde cilíndrico (cm^3);

W = teor de umidade do solo compactado (%).

Repetiu-se o processo por mais cinco vezes para cada dosagem a fim de obter pontos suficientes, tanto no ramo seco quanto no ramo úmido, para gerar curvas de compactação adequadamente.

3.8 Ensaio de penetração

Este ensaio, com relação à aplicação rodoviária, foi realizado com embasamento na norma DNIT 172/2016 ME. Assim sendo, optou-se por analisar a expansibilidade do material para a aplicação em sub-bases, uma vez que para cada camada do pavimento há uma metodologia diferente, variando o número de golpes. No caso em questão, foi utilizado o cilindro grande, com 5 camadas de 26 golpes (Figura 15-a), sempre se atentando para, após a compactação, ocorrer o correto aplainamento da superfície da amostra (Figura 15-b).

Após a compactação, se retiraram os espaçadores de cada corpo de prova e estes foram invertidos e fixados nos pratos-base perfurados. Além disso, em todos os corpos de prova, foram colocados os pesos anelares e fixadas as hastes de expansão, então se adaptou em cada haste de expansão um extensômetro, de modo que possibilitou a leitura da expansão a cada 24 horas, durante quatro dias, conforme preconizado na norma DNIT 172/2016 ME. Para realizar as leituras todos os ponteiros do extensômetro foram regulados a fim de estarem na marcação zero no início do ensaio, atentando-se também para que os extensômetros estivessem bem fixados, de modo a evitar possíveis interferências.

Figura 15 – (a) Compactação com cilindro grande; (b) Aplainamento da amostra.



Fonte: O autor.

Assim sendo, após a montagem do sistema solo-extensômetro conforme mencionado, as amostras foram submetidas à imersão em água para leituras posteriores (Figura 16).

Figura 16 – Corpos de prova em imersão e com o extensômetro.



Fonte: O autor.

O cálculo da expansão deu-se através da diferença entre as leituras inicial e final, de modo percentual, com relação ainda à altura inicial do corpo de prova, conforme a Equação 6:

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{L_f - L_i}{H_i} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

L_f = Leitura inicial do extensômetro (mm);

L_i = Leitura inicial do extensômetro (mm);

H_i = altura inicial do corpo de prova (mm).

Desse modo, a partir da obtenção da altura inicial dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro, pode-se estimar a expansibilidade do material, conforme a Equação 6.

Ainda, com a realização de todos os ensaios mencionados neste capítulo, possibilitou-se a análise da cal hidratada como aditivo ao solo, bem como a caracterização física do solo natural de um modo geral.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são estudados os resultados dos ensaios citados na metodologia deste trabalho. Tal estudo visa analisar as alterações ocorridas nas características físicas do solo natural quando submetido a diferentes dosagens de cal hidratada.

4.1 Caracterização granulométrica

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, a classificação granulométrica do solo foi realizada de acordo com a dimensão dos grãos, por intermédio das classificações AASHTO e ABNT, estas se encontram descritas nos tópicos subsequentes.

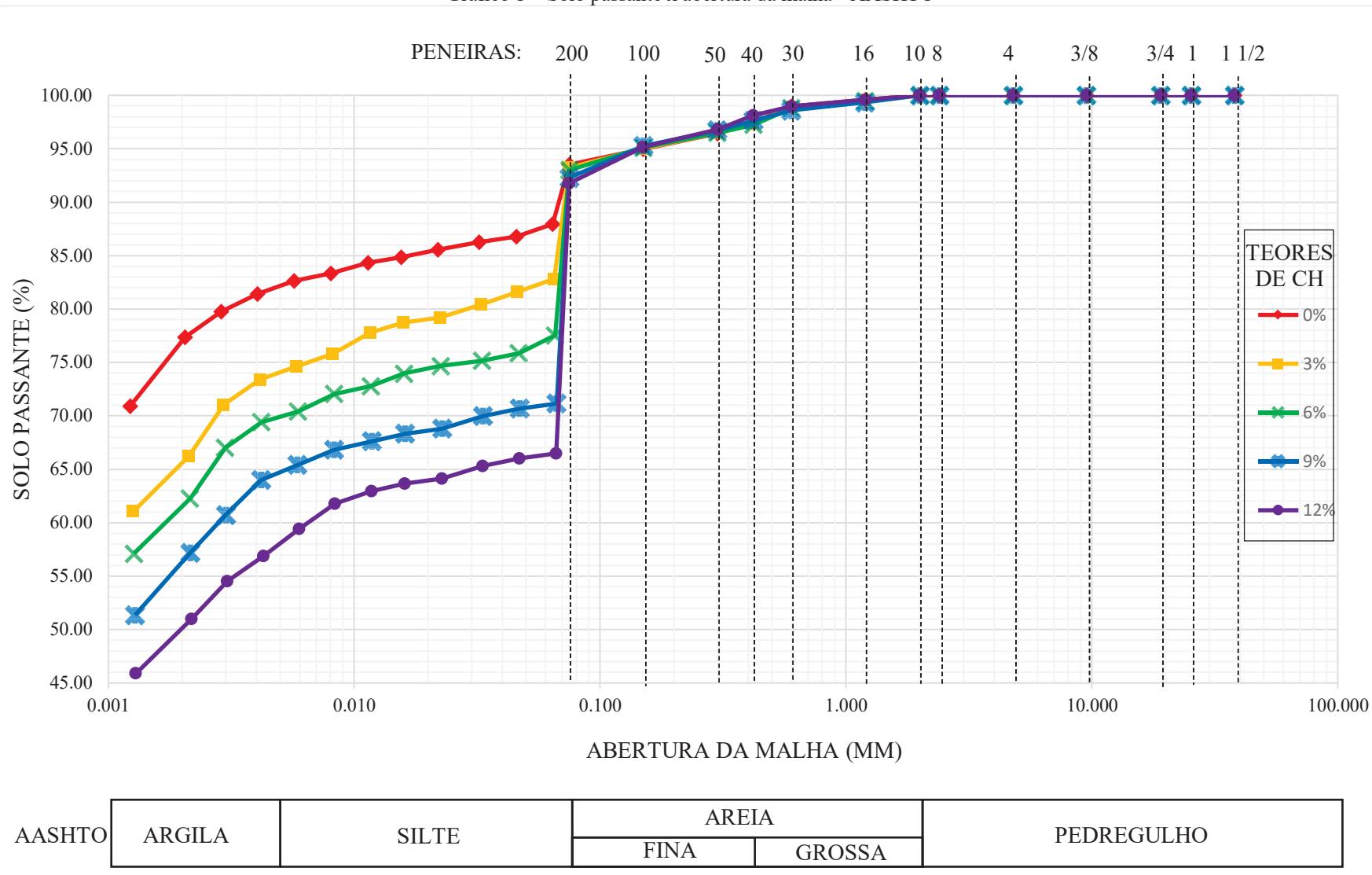
4.1.1 Classificação AASHTO

O Gráfico 1 apresenta as curvas granulométricas obtidas com as diferentes dosagens de cal hidratada. Percebe-se através deste, de um modo geral, a inexistência de pedregulho, além disso verifica-se que a fração de areia fina manteve-se em cerca de 2,5% e a fração de areia grossa em cerca de 4%. Possivelmente, devido a cal hidratada se tratar de um material pulverulento, não propiciou alterações em tais faixas. Contudo, nas faixas de silte e argila, houve aumentos significativos devido a incorporação do aditivo.

Além disso, os Gráficos 2-a e 2-b apresentam os teores de silte e argila de acordo com a adição de cal hidratada, respectivamente.

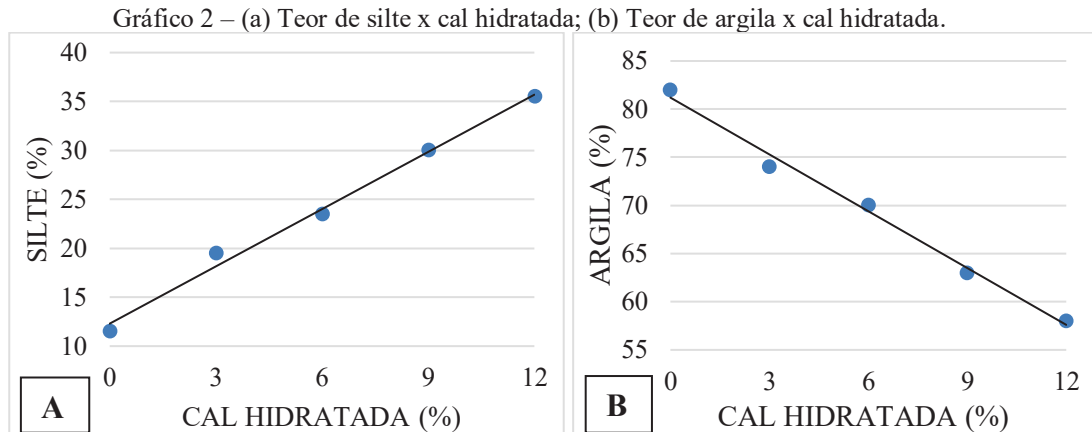
Ao analisar o Gráfico 2-a, observa-se um aumento na fração de material siltoso à medida que foi adicionada cal hidratada. Em adição, possivelmente devido às ações cimentantes ou ao próprio incremento da CH, quanto maior foi a dosagem incorporada, maior foi a fração siltosa. Adicionando-se 12% de CH houve um aumento da ordem de 24% no teor de silte em relação ao solo natural.

Gráfico 1 – Solo passante x abertura da malha - AASHTO



Fonte: O autor.

Por sua vez, o Gráfico 2-b apresenta os teores de argila obtidos de acordo com o incremento de cal hidratada.



Fonte: O autor.

Observa-se uma diminuição dos teores de argila com o incremento da cal hidratada. Uma hipótese é que tal fato se deve às propriedades ligantes da cal hidratada, sendo que estas promovem uma maior interação entre os grãos de menores dimensões. Estes se tornam mais coesos e criam estruturas cristalinas tais quais as ocorridas no solo cimento, conforme estudado por Azevêdo (2010). Adicionando-se 12% de CH houve um aumento da ordem de 24% no teor de argila em relação ao solo natural.

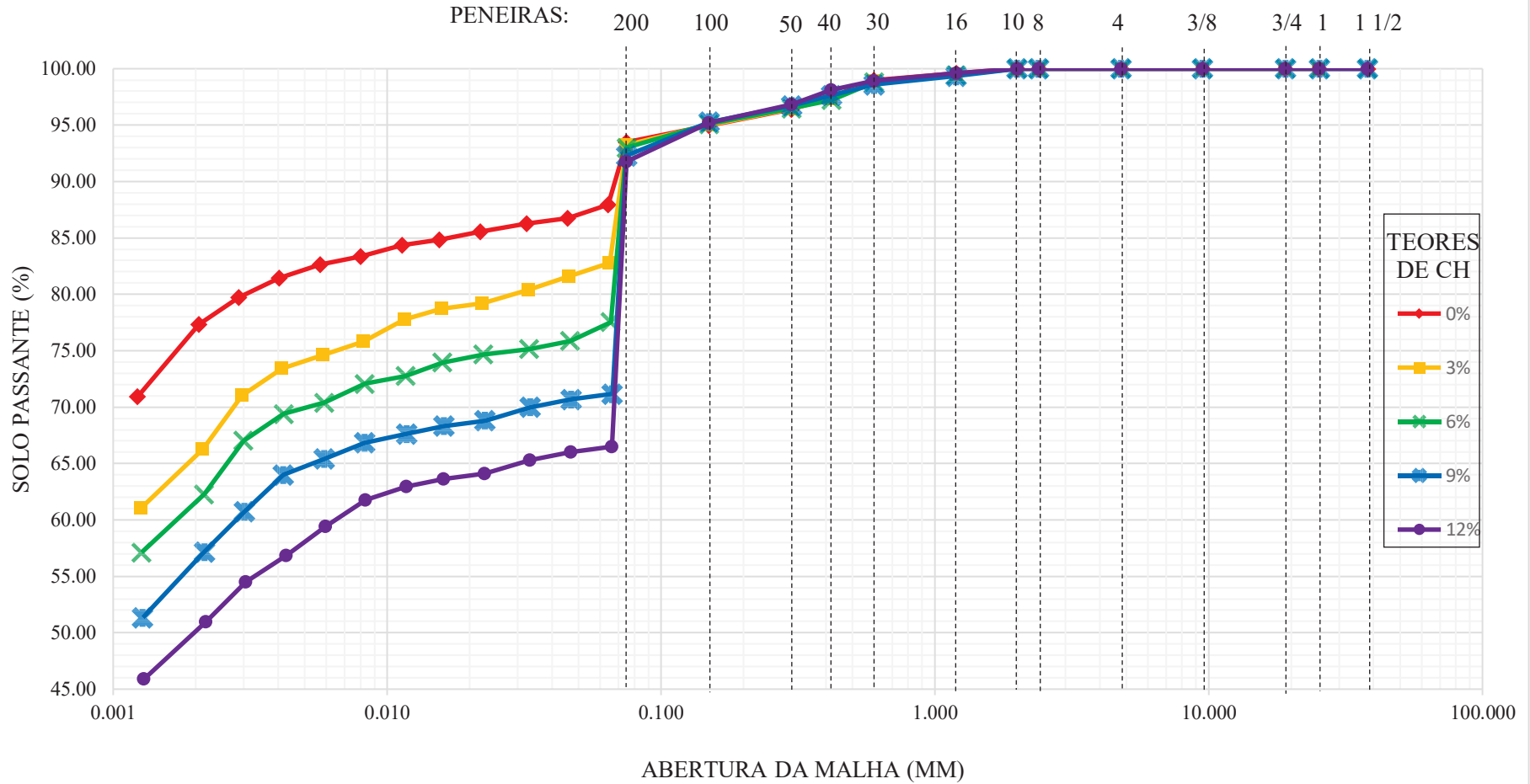
4.1.2 Classificação segundo a ABNT

O Gráfico 3 apresenta as curvas granulométricas com os diferentes teores de cal hidratada. Pode-se perceber que, com o incremento da CH, houve, em relação ao solo a 0% de CH, um deslocamento das curvas para baixo de forma praticamente paralela.

Além disso, verifica-se que, analogamente à classificação AASHTO, há a não presença de pedregulho no material, visto que este pôde ser identificado, ainda numa prévia análise visual, como sendo fino. Além disso, houve um aumento significativo nos teores de areia e uma redução nos teores de argila, já o silte apresentou-se com poucas alterações ao longo das dosagens.

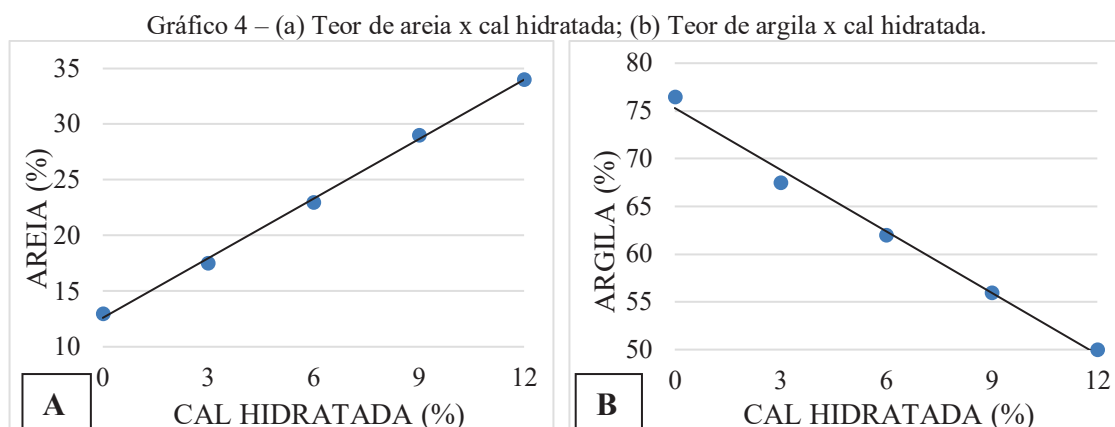
Os Gráficos 4-a e 4-b apresentam as alterações dos teores de areia e argila de acordo com o incremento de cal hidratada, respectivamente.

Gráfico 3 – Solo passante x abertura da malha – ABNT.



ABNT	ARGILA	SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
			FINA	MÉDIA	GROSSA	FINO	MÉDIO	GROSSO

Fonte: O autor.



Fonte: O autor.

Verifica-se no Gráfico 4-a que houve um aumento gradual no teor de material arenoso à medida que foi adicionada cal hidratada ao solo. Adicionando-se 12% de CH houve um aumento da ordem de 21% no teor de areia em relação ao solo natural.

Ainda, ao analisar o Gráfico 4-b, percebe-se que houve uma redução gradual na porcentagem de material argiloso à medida que foi adicionada cal hidratada ao solo. Adicionando-se 12% de CH houve um decréscimo da ordem de 26% no teor de argila em relação ao solo natural.

Não obstante, de modo a comparar as duas classificações, a Tabela 2 apresenta os percentuais obtidos em cada faixa do solo a 12% de CH em ambas as classificações, bem como a diferença entre elas.

Tabela 2 – Comparativo das frações de solo entre ABNT e AASHTO.

Classificação	ABNT	AASHTO	Diferença
ARGILA (%)	50	58	8,0
SILTE (%)	16	35,5	19,5
AREIA (%)	34	6,5	27,5
PEDREGULHO (%)	0	0	-

Fonte: O autor.

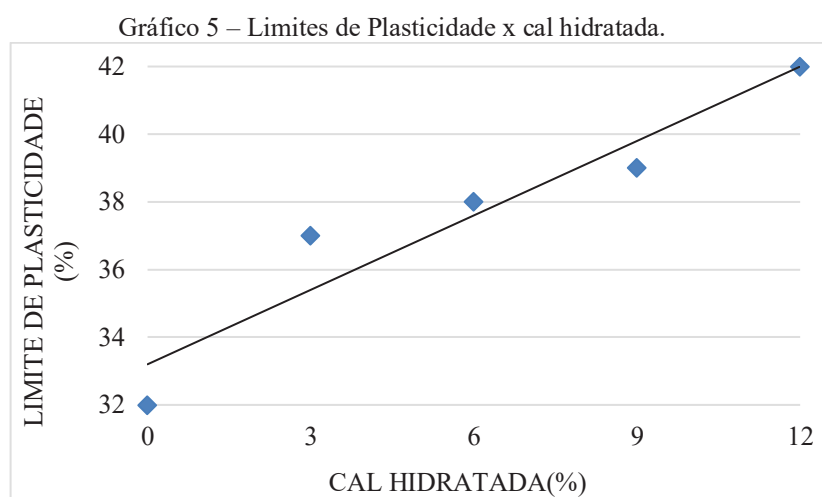
Observa-se que, entre as duas classificações, as maiores discrepâncias encontram-se entre as faixas de silte e areia. Tal fato deve-se à classificação ABNT abranger uma faixa granulométrica de areia um pouco mais ampla e, desse modo, uma faixa de silte um pouco menor, quando comparadas com a AASHTO. Ademais, tal faixa localiza-se na zona onde ocorreram as maiores alterações com a adição da CH.

4.2 Limites de atterberg

4.2.1 Limite de Plasticidade

Para o limite de plasticidade foram realizadas dentre três a cinco amostragens por dosagem para garantir a veracidade dos dados. As umidades obtidas não diferiram mais do que 5% em relação a média, portanto não houve a necessidade de descartar nenhum dos valores obtidos.

O Gráfico 5 apresenta os limites de plasticidade obtidos de acordo com a dosagem de CH empregada. Verifica-se um aumento do limite de plasticidade com o incremento da CH. Uma possível justificativa para este fato é que a cal hidratada comercial, amplamente utilizada em argamassas, tem requisitos normativos que preveem a esta uma boa plasticidade para melhorar sua trabalhabilidade, conforme expresso na NBR 7175 (ABNT, 2003).



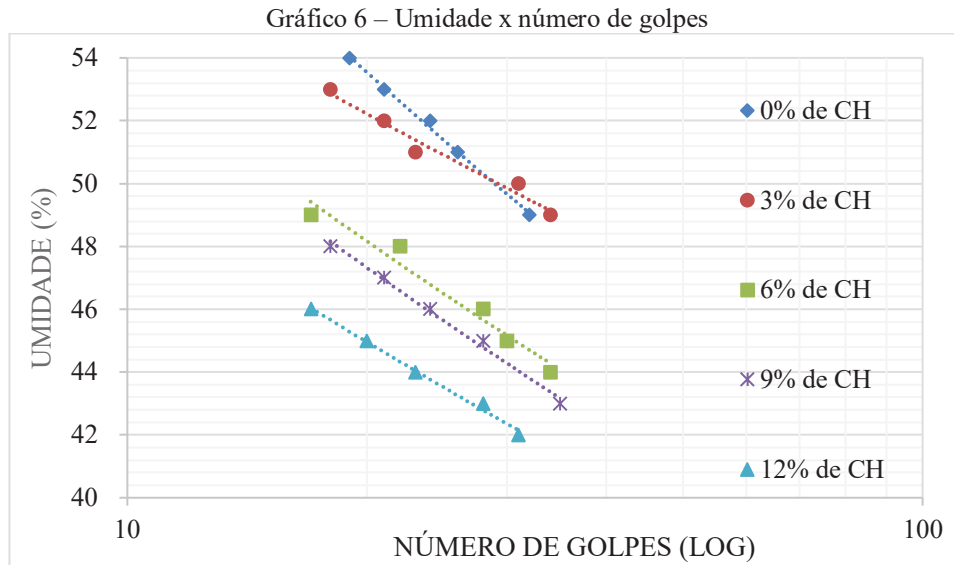
Fonte: O autor.

Evidencia-se ainda que, dentre as dosagens de 0% a 12% de CH, houve uma alteração de 9% do LP.

4.2.2 Limite de Liquidez

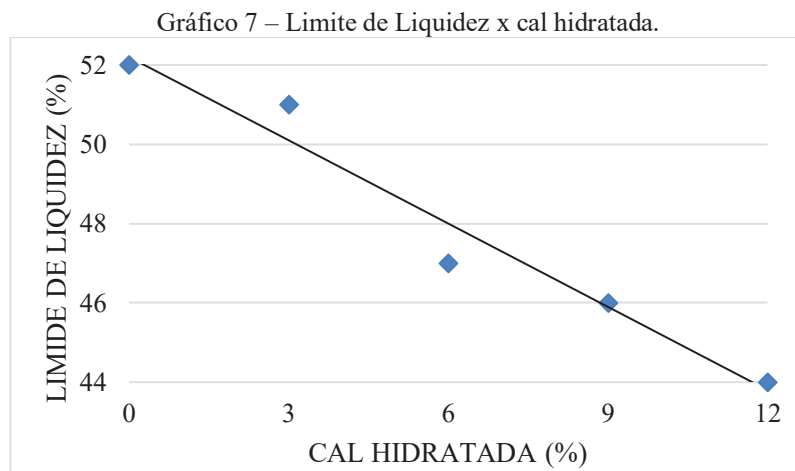
O Gráfico 6 apresenta os pontos obtidos para o limite de liquidez dentro de cada dosagem de CH. Observa-se a tendência das retas deslocarem-se para baixo de forma aproximadamente paralela, conforme a adição de cal hidratada. Ainda, diferentemente, das outras dosagens, observa-se uma intersecção entre as dosagens de 0% e 3% de CH.

Os ensaios, de um modo geral, foram obtidos com pontos entre 17 e 35 golpes, faixa esta preconizada pela NBR 6459 (ABNT, 2017).



Fonte: O autor.

Por sua vez, o Gráfico 7 apresenta os Limites de Liquidez para cada dosagem de CH.



Fonte: O autor.

Tal qual o limite de plasticidade, o limite de liquidez apresenta uma tendência, contudo decrescente. Ainda, observa-se que a redução do LL foi de aproximadamente 8% quando comparados os valores obtidos nos extremos, ou seja, as dosagens de 0% e 12% de CH.

4.2.3 Índice de Plasticidade

Não menos importante, calculou-se o Índice de Plasticidade (IP), sendo que tal índice consiste na diferença entre o LL e o LP. Para classificar o solo quanto a seu IP utilizou-se a Tabela 3 .

Tabela 3 – Avaliação do índice de plasticidade

IP	DEFINIÇÃO
IP = 0	NÃO PLÁSTICO
1 < IP < 7	POUCO PLÁSTICO
7 < IP < 15	PLASTICIDADE MÉDIA
IP > 15	MUITO PLÁSTICO

Fonte: Caputo (1988).

Desse modo, na Tabela 4, obtêm-se a classificação das amostras.

Tabela 4 – Classificação do solo conforme o índice de plasticidade

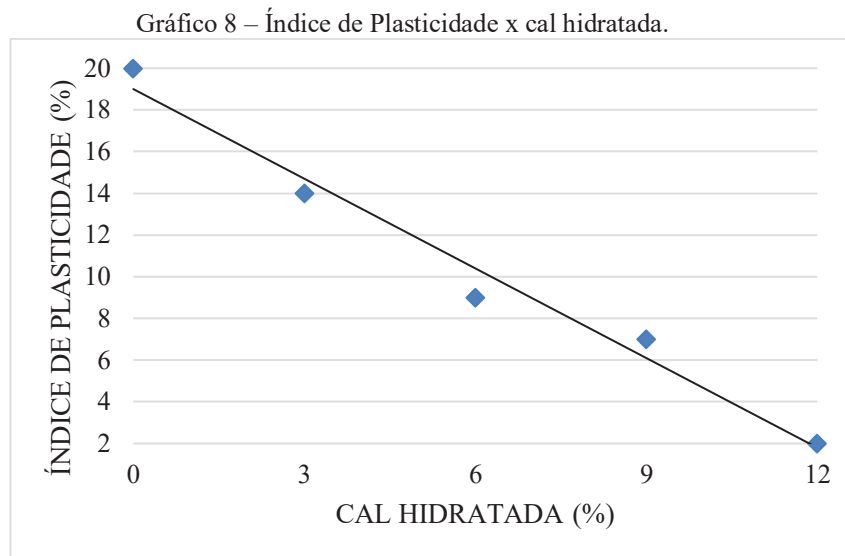
SOLO	LL	LP	IP	DEFINIÇÃO
0%	52%	32%	20%	MUITO PLÁSTICO
3%	51%	37%	14%	PLASTICIDADE MÉDIA
6%	47%	38%	9%	PLASTICIDADE MÉDIA
9%	46%	39%	7%	DE POUCO A MEDIANAMENTE PLÁSTICO
12%	44%	42%	2%	POUCO PLÁSTICO

Fonte: O autor.

Verifica-se que houve uma grande alteração no índice de plasticidade, sendo que este variou de muito plástico a pouco plástico, quando comparadas as dosagens de 0% e 12% de CH, respectivamente.

Ainda, com relação a classificação do solo dosado com 9% de CH, vale ressaltar que esta pode ser enquadrada tanto como tendo pouca ou média plasticidade, visto que a plasticidade de 7% é um valor que se encontra num intervalo de transição entre ambos.

O Gráfico 8 apresenta os índices de plasticidade obtidos de acordo com a dosagem de cal hidratada. Através deste constata-se que houve uma redução de até 18% no índice de plasticidade para as porcentagens trabalhadas.



Fonte: O autor.

A redução do índice de plasticidade, conforme o Gráfico 8, ocorreu possivelmente devido ao fato da cal hidratada conferir inicialmente um aspecto mais grosseiro e friável ao material devido à ação da floculação, conforme o exposto por Corrêa (2009).

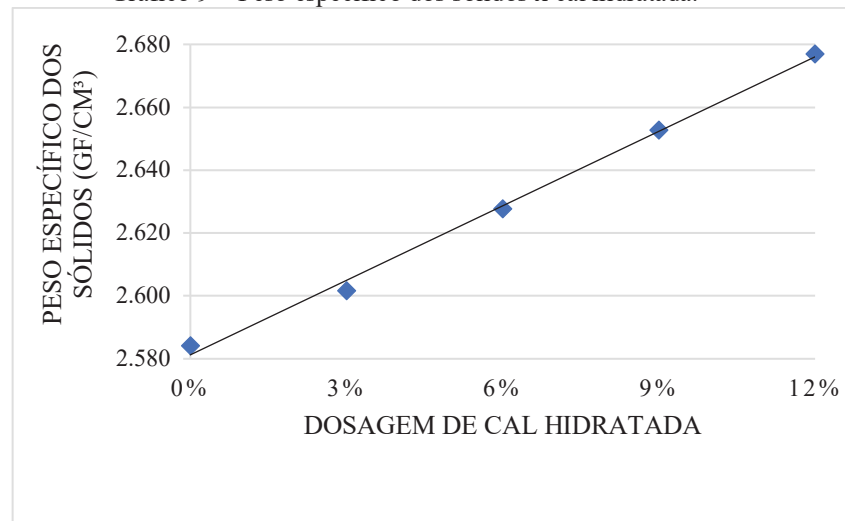
4.3 Peso Específico

Neste estudo em questão, nenhum dos pontos apresentou-se fora deste limite, estando em consonância com o exigido na NBR 6458 (ABNT, 2016).

Ademais, vale ressaltar que a referida norma prevê 50 gf para a realização do ensaio, mas visto que o solo da região em estudo é altamente argiloso e, devido a isso, exige-se uma grande quantidade água destilada para limpar os equipamentos e não haver perda de grãos, optou-se por utilizar as 40 gf para não ultrapassar as marcas de calibração dos balões volumétricos.

O Gráfico 9 apresenta os pesos específicos dos sólidos de acordo com a dosagem de cal hidratada. Percebe-se através deste que o solo natural apresentou um peso específico dos sólidos de 2,584 gf/cm³. Este se apresenta um pouco abaixo do esperado para o tipo de solo estudado, contudo, tal fato pode ter sido originado devido à quebra dos grãos, uma vez que o material da coleta havia sido compactado previamente com rolo compressor. Observa-se ainda que o incremento da cal hidratada proporciona um aumento no peso específico dos sólidos.

Gráfico 9 – Peso específico dos sólidos x cal hidratada.



Fonte: O autor.

Por sua vez, na Tabela 5 apresentam-se os dados necessários para a realização do cálculo do peso específico dos sólidos, bem como os resultados obtidos e a máxima variação entre eles.

Tabela 5 – Pesos específicos.

Dosagem	P ₁ (gf)	P ₂ (gf)	P ₃ (gf)	γ_s (gf/cm ³)	γ_s médio (gf/cm ³)	$\Delta \gamma_s$ (gf/cm ³)
0%	40,04	718,32	694,68	2,585	2,584	0,002
	40,02	696,39	672,77	2,583		
	40,02	693,66	670,04	2,584		
3%	40,04	718,31	694,56	2,603	2,602	0,013
	40,02	696,41	672,65	2,607		
	40,02	693,61	669,92	2,594		
6%	40,20	697,38	673,42	2,624	2,628	0,018
	40,01	697,22	673,41	2,617		
	40,07	692,14	668,16	2,642		
9%	40,01	697,94	673,97	2,650	2,653	0,015
	40,05	697,81	673,75	2,662		
	40,30	692,82	668,69	2,647		
12%	40,01	718,71	694,56	2,682	2,677	0,014
	40,07	696,76	672,65	2,668		
	40,01	694,07	669,92	2,682		

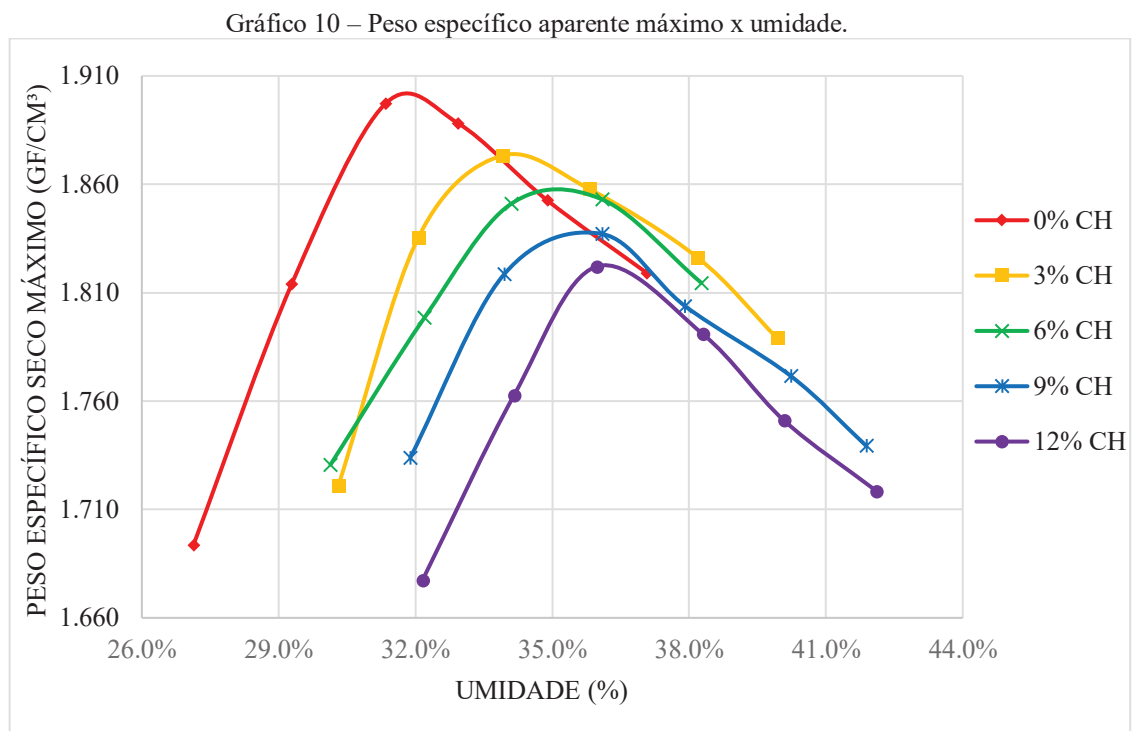
Fonte: O autor.

Com relação ao solo a 0% e o solo a 12%, houve um aumento de 0,093 gf/cm³ (3,6%) no peso específico dos sólidos. Ainda, entre cada dosagem, houve um incremento de aproximadamente 0,025 gf/cm³.

4.4 Compactação

Para o ensaio de compactação moldaram-se seis corpos de prova por dosagem, sendo que foram obtidas amostras de umidade suficientes para garantir a sua homogeneidade. Em relação a tais umidades, estas não vieram a divergir mais do que cerca 1% em relação à média.

O Gráfico 10 apresenta as curvas de compactação obtidas para as diferentes dosagens de cal hidratada.



Conforme o Gráfico 10, para o solo a 0% de CH percebe-se que o peso específico aparente seco máximo é de 1,905 gf/cm³, já a sua umidade ótima é de 31,8%. Além disso, evidencia-se que para o solo a 3% de CH o peso específico aparente seco máximo de 1,875 gf/cm³ na umidade ótima de 34,1%. Ainda, no que diz respeito ao solo a 6% de CH, obtém-se um peso específico aparente seco máximo de 1,858 gf/cm³ com uma umidade ótima é de 35%. Em relação ao solo com 9% de CH, obtém-se um peso específico aparente seco máximo de 1,838 gf/cm³, com uma umidade ótima é de 35,7%. Em adição, para o solo a 12% de CH, obtém-se um peso específico aparente seco máximo de 1,823 gf/cm³ e uma umidade ótima de 36,3%.

Ademais, comparando-se todas as curvas de compactação, percebe-se que há uma tendência: quanto maior a dosagem de CH maior foi a umidade ótima obtida e menor foi o

peso específico seco máximo. Além disso, de um modo geral, percebe-se que o afastamento entre as curvas de solo-cal é proporcional e este é também acentuado em relação ao solo a 0% de CH. De um modo geral, houve uma variação de 4,5% na umidade ótima e de 4,3% dentre os pesos específicos aparentes secos máximos.

4.5 Classificação do solo segundo a AASHTO

Para a classificação rodoviária do solo utilizou-se os parâmetros estabelecidos pela AASHTO. Desse modo, a fim de obter a aplicabilidade do solo como material para subleito, procedeu-se a classificação conforme a Figura 17.

Figura 17 – Classificação rodoviária (AASHTO).

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)						Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)					
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7		
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7	A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	
	0		0	0			4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa			Solos Siltosos		Solos argilosos			
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom						Fraco a pobre					

Fonte: HOLZ (2007).

No estudo em questão, quando as amostras se enquadraram no grupo A-7, como os índices de plasticidade foram maiores do que LL - 30, pôde-se enquadrá-los no grupo A-7-6. A classificação rodoviária apresenta-se na Tabela 6.

Verifica-se que a partir da dosagem de 6%, devido às maiores incorporações de material siltoso presente na cal hidratada, a mistura passou de solo argiloso para um solo siltoso. Além disso, o solo argiloso caracterizou-se no grupo A-7-6 e o solo siltoso no grupo A-5. No que diz respeito ao índice de grupo, este foi classificado conforme a Figura 17.

A AASHTO estabelece que quanto maior o IG pior é a qualidade do material para a aplicação em subleitos, sendo que este pode variar dentre 0 (excelente a bom) a 20 (fraco a pobre). Além disso, para obter o IG, arredondou-se o resultado obtido para o número inteiro acima.

Tabela 6 – Classificação rodoviária.

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO PARA USO COMO SUBLEITO DE PAVIMENTOS					
SOLO A 0% DE CH					
N. PENEIRA	% PASSANTE	LL	IP	GRUPO	IG
10	100	52	20	Solo argiloso A-7-6	14,4 (15)
40	97,48				
200	93,49				
SOLO A 3% DE CH					
N. PENEIRA	% PASSANTE	LL	IP	GRUPO	IG
10	100	51	14	Solo argiloso A-7-6	11,8 (12)
40	97,36				
200	93,24				
SOLO A 6% DE CH					
N. PENEIRA	% PASSANTE	LL	IP	GRUPO	IG
10	100	47	9	Solo siltoso A-5	9,4 (10)
40	97,23				
200	93				
SOLO A 9% DE CH					
N. PENEIRA	% PASSANTE	LL	IP	GRUPO	IG
10	100	46	7	Solo siltoso A-5	9,2 (10)
40	97,63				
200	92,28				
SOLO A 12% DE CH					
N. PENEIRA	% PASSANTE	LL	IP	GRUPO	IG
10	100	44	2	Solo siltoso A-5	8,8 (9)
40	98,13				
200	91,76				

Fonte: O autor.

Ainda, conforme os dados da Tabela 6, levando-se em conta a classificação da Figura 17, pode-se evidenciar que este se apresentou com qualidade variando de fraca a pobre, de modo que tão melhor foi o índice de grupo obtido quanto o aumento da dosagem de cal hidratada, obtendo assim um IG variando, dentre 0 e 12% de CH, de 15 a 9, respectivamente.

4.6 Ensaio de Expansão

Para a realização do ensaio de expansão necessitou-se medir a altura de cada corpo de prova, sendo estas realizadas com o auxílio de um paquímetro. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para cada corpo de prova.

Tabela 7 – Alturas dos corpos de prova.

CP	0% CH	3% CH	6% CH	9% CH	12% CH
Hi (mm)	113,8	114,12	113,95	114,25	114,45

Fonte: O autor.

Conforme se pode evidenciar, os corpos de prova apresentaram pouca variação entre eles, menos de 1 cm.

Por sua vez, a Tabela 8 apresenta os resultados das leituras dos extensômetros em um período de 96 horas, sendo expressa também a expansão obtida para cada dosagem.

Tabela 8 – Leituras e resultados dos ensaios de expansão.

ENSAIO DE EXPANSÃO						
DATA	TEMPO DE ENSAIO	0% CH	3% CH	6% CH	9% CH	12% CH
17/09/2018	0h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18/09/2018	24h	0,210	-0,028	-0,062	-0,090	-0,100
19/09/2018	48h	0,270	-0,047	-0,063	-0,087	-0,100
20/09/2018	72h	0,300	-0,050	-0,065	-0,090	-0,100
21/09/2018	96h	0,310	-0,050	-0,065	-0,090	-0,100
Expansão (%)		0,27%	-0,04%	-0,06%	-0,08%	-0,09%

Fonte: O autor.

Percebe-se que para a dosagem de 12% foi obtido o menor percentual de expansibilidade do solo, havendo inclusive retração. Além disso, verifica-se que a dosagem de 3% apresenta-se, levando em consideração apenas este parâmetro, como a mais adequada para a aplicação em subleitos de pavimentos. Visto que a CH inibe o processo de expansão, uma adição superior a 3% não é vantajoso física e economicamente.

Ainda, vale ressaltar que o DNIT (2006) preconiza que a expansão do solo deve ser menor ou igual a 2% e para a aplicação em sub-base deve ser menor ou igual 1%. Desse modo, tanto para as outras camadas, quanto para o subleito, o material atende aos critérios de expansibilidade, mesmo sem o melhoramento.

No entanto, os resultados obtidos podem servir apenas como um indicativo, visto que o ensaio de expansão não foi realizado em sua totalidade, nem tampouco na umidade ótima, uma vez que não foi obtida a curva de compactação para a energia modificada, mas apenas para a energia normal. Desse modo, a fim de obter um parâmetro, utilizou-se um corpo de prova para cada dosagem em uma umidade de cerca de 33% a fim de analisar o comportamento do material. Tal umidade foi utilizada como referência por ser um valor intermediário entre as umidades ótimas obtidas no ensaio de Proctor Normal.

5 CONCLUSÃO

Em relação à trabalhabilidade do material puderam-se observar resultados bastante expressivos. Reduziram-se os limites de liquidez e aumentaram-se os limites de plasticidade. Consequentemente, o índice de plasticidade do material, dentre as dosagens de 0 e 12%, variou de 20 (muito plástico) a 2 (pouco plástico), respectivamente. Desse modo, de acordo com a aplicação do material, pode-se adicionar cal hidratada ao solo até reduzir a plasticidade a intervalos de interesse.

Além disso, observou-se um ganho no peso específico dos sólidos conforme a adição de cal hidratada. Este variou de 2,584 gf/cm³ a 2,677 gf/cm³ entre as dosagens de 0 e 12% de cal hidratada, respectivamente. Tal fato pode ter sido ocasionado por causa da interação entre os grãos que, através das propriedades cimentantes da cal hidratada e, consequentemente, a densificação do solo, tornou o material mais coeso, reduzindo assim os espaços vazios. Além disso, pode-se tê-lo aumentado puramente devido à influência do peso específico dos sólidos da cal hidratada. Para verificar tais hipóteses é necessário realizar um estudo por microscopia eletrônica de varredura, a fim de observar a estrutura do material.

Ademais, no que diz respeito à análise granulométrica, percebeu-se que o material é puramente composto de finos, mesmo após o incremento da cal hidratada. Em ambas as classificações, ABNT e AASHTO, houve a redução do material argiloso de acordo com o incremento da cal hidratada. Não obstante, na classificação ABNT, aumentou-se predominantemente a porcentagem de areia da amostra, já na classificação AASHTO aumentou-se a fração de silte. Vale ressaltar que as maiores alterações ocorreram a partir das dimensões inferiores a 0,075 mm.

No que diz respeito a análise para aplicação rodoviária, percebeu-se que, mesmo com a redução da fração argilosa, ainda assim o material não se apresentou, sob o ponto de vista granulométrico, viável para a aplicação de subleitos de pavimentos. As amostras de 0% e 3% de CH caracterizaram-se no grupo A-7-6, sendo designadas como solos argilosos, já as amostras com 6%, 9% e 12% de CH passaram para o intervalo A-5, solo siltoso. Além disso, o índice de grupo variou de 9 a 15, valores estes que não atende aos padrões exigidos. Portanto, indica-se o solo em estudo apenas para a estabilização granulométrica de um material em casos que se deseje aumentar a fração de finos.

Já em relação à análise da expansão pode-se perceber que a cal hidratada atuou positivamente nesse processo, visto que a sua adição a inibiu, causando inclusive retração, contudo com valores muito baixos, da ordem de 0,10%. Visto isso, percebeu-se que o

incremento de 3% de cal hidratada na amostra foi suficiente para inibir a expansão do material. Desse modo, aplicar mais cal hidratada, para essa finalidade, torna-se desnecessário, apenas tornando o processo mais oneroso. Uma vez que o solo obteve uma expansão inferior a 0,50% pode-se utilizá-lo em todas as camadas do pavimento, sob esse aspecto.

Não menos importante, em relação à compactação com Proctor Normal, evidenciou-se que, a partir do incremento do aditivo, houve um deslocamento das curvas de compactação, de modo que reduziram-se os pesos específicos secos máximos (de 1,905 gf/cm³ para 1,823 gf/cm³) e aumentaram-se as umidades ótimas (de 31,8% para 36%). Assim sendo, menores pesos específicos secos refletem a necessidade de menores quantidades de material por volume para a compactação, gerando economia tanto no processo em si, por possivelmente necessitar de menos passadas com o equipamento, quanto no custo com movimentação de solo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de abranger outros aspectos, se sugere que para estudos posteriores sejam realizados os ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial para analisar a aplicabilidade do material segundo suas características mecânicas. Além disso, sugere-se que seja realizada a incorporação de cal em um solo granular, para fins de pavimentação. Ademais, devem ser realizados estudos do solo com outros aditivos, tais como resíduos da construção civil e geotêxtil e, não menos importante, estudar a cal hidratada com relação ao seu tempo de cura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA FILHO, Wilson Barbosa de. **Emprego da mistura solo-cimento em bases e sub-bases de pavimento**. 27 p. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **Guide for design of pavement structures**. Washington, D.C., 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 14 p.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017. 9 p.

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassa – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 7 p.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 16 p.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.

AZEVÊDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de solos com adição de cal**: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 178 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALDOVINO, Jair A, et al. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical**

Engineering. 2018, p.188-194. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.001>

BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Org.). **Materiais de construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 488 p. 1 v.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008. 504 p.

BRAJA, M. D. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. Brasília, 2017. 89 p.

CAIRES et al. **Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema de plantio direto**. 12p. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2002.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 6. ed. 234 p. 1 v.

CARNEIRO, José Ricardo da Cunha. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos**. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Porto, Portugal, 2009. 534 p.

CARNEIRO, Alex Pires; BURGOS, Paulo César; ALBERTE, Elaine Pinto Varela. Uso de agregado em camadas de base e sub-base de pavimentos. In: CARNEIRO, Alex Pires et al. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: Projeto entulho bom**. Salvador: Edufba; Caixa Econômica Federal, 2001. Cap. 6. p. 188-227

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. **A cal na construção**. Minho: TecMinho, Universidade do Minho, 2009. 132 p.

Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas**. Brasília, 2017. 229 p.

CORRÊA, Juliana Francisca. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação. 151 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR). **Pavimentação: macadame hidráulico**. ES-P 04/05 - Instrução normativa. Curitiba, 2005. 12 p.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR). **Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento**. ES-P 11/05 - Instrução normativa. Curitiba, 2005. 19 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Mapa Simplificado de Solos do Estado do Paraná**. 2012. 1p.

GUÉRIOS, Eduan Maganhotto. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano**. 69 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

GUIMARÃES, J. E. P. **Solo-cal: Como construir**, 1995. Disponível em: <<http://piniweb17.pini.com.br/construcao/noticias/solo-cal-86743-1.aspx>> . Acesso em 11 mar. 2018 às 19:35.

HOLZ, Raquel da Fonseca. **Notas de aula da disciplina de Projeto de Estradas de Rodagem**. Fundação Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Rio Grande, 2007. Disponível em: <<https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/projeto-de-estradas-de-rodagem.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2018 às 14h00.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual Técnico de Pedologia**. 2 ed. 316 p. Rio de Janeiro, 2007.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2004.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de aula da disciplina de Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2006.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 208p.

NEVES, Eduardo Nuno Sousa de Azevedo Castro. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal: modelos de comportamento**. 176 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2009.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual técnico de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p. 1 v.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001. 671 p. 2 v.

SUSUNAGA, Maria Paula Salazar. **Geotêxteis em separação de camadas de pavimentos**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.