

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LÍVIA VANESSA DA SILVA TELINO

ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM CAL

CAMPO MOURÃO

2023

LÍVIA VANESSA DA SILVA TELINO

ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM CAL

Stabilization study of clay soil with lime

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Wilson dos Santos Ferreira.

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LÍVIA VANESSA DA SILVA TELINO

ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM CAL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel Engenharia Civil pela da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16 de novembro de 2023

Prof. José Wilson dos Santos Ferreira
Doutorado em Geotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Ewerton Clayton Alves da Fonseca
Doutorado em Geotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Eliana Fernandes dos Santos
Doutorado em Infraestrutura de Transportes
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão primeiramente a Deus, por me conceder força, discernimento e determinação para conquistar mais uma vitória, entre as muitas que já alcancei. Sou grata pela sua presença ao meu lado nos momentos bons e ruins da minha vida, e pelas oportunidades que me ajudou a escolher.

Agradeço à minha família, a base de tudo que sou hoje: à minha mãe Marilene, ao meu pai Edison, às minhas irmãs Andreza, Lana e Karine, e à minha querida e maravilhosa sobrinha Julia, que com um simples áudio muitas vezes tornava os meus dias incríveis. Agradeço também à minha tia Eliene, que sempre acreditou em mim, e a todos os meus familiares que de alguma forma fazem parte da minha história. Não posso deixar de mencionar o meu namorado Lucas Saskoski e toda a sua família, pelo apoio e amor que recebi mesmo estando distante.

Em seguida, gostaria de agradecer às minhas incríveis amigas que adquiri ao longo da graduação, por me tolerarem e me deixarem ser quem sou perto de vocês, em especial ao João Victor, Helena Yakuda, Debora Kimberly, Gustavo Maffort por me acompanhar na construção do TCC, Jessica Eisele e Sabrina Arêde. Não posso deixar de mencionar Aline Cristina e Davyllen Fernandes, cuja amizade foi fundamental em diversos momentos importantes.

A José Wilson dos Santos Ferreira, gostaria de expressar a quão única foi a experiência de ser orientada por você. Admiro sua pessoa e seu profissionalismo, e tornei-me uma profissional melhor por tê-lo conhecido. Sua didática impecável despertou em mim um grande carinho para o desenvolvimento deste trabalho.

A Fábio Kruger, o técnico de laboratório que fez toda a diferença para que este trabalho fosse concluído, agradeço a atenção, cuidado e o seu auxílio com os materiais e ensaios realizados.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Campo Mourão por me proporcionar a oportunidade de me conectar com profissionais incríveis e por criar um ambiente de desafios e oportunidades.

RESUMO

No âmbito da engenharia civil, o solo é um material de construção e suporte muito utilizado. No entanto, na natureza, nem sempre ele atinge os valores de resistência exigidos para execução dos diversos tipos de projeto. Nesses casos, é fundamental considerar a possibilidade de buscar soluções alternativas. Essas soluções consistem em explorar novas áreas, bem como o melhoramento desse solo já existente, a partir da inserção de agentes químicos, como o cimento e a cal. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a estabilização química por meio da inserção de 8% de cal ao solo argiloso de Campo Mourão. Para isso, foram realizados ensaios de análise granulométrica, massa real dos grãos, fluorescência de raios-x, método do pH de dosagem, compactação e ensaio de resistência à compressão simples (RCS), avaliando os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias, considerando as condições experimentais com e sem imersão dos corpos de prova em água. A partir dos resultados, observou-se que o método do pH não apresentou eficiência para obter a quantidade de cal necessária para estabilização do solo, devido à presença significativa de ferro e alumínio no material. Em relação a compactação, a inserção de cal fez a massa específica aparente seca máxima diminuir e o teor de umidade ótimo aumentar, em função da baixa densidade da cal e sua elevada superfície específica. Em relação a RCS, pode-se observar que a resistência aumentou com a inclusão de cal e os períodos de curas não influenciaram na resposta, havendo constância nos valores após 3 dias.

Palavras-chave: estabilização; solo-cal; método do pH; solo-argiloso.

ABSTRACT

In the context of civil engineering, soil is a widely used construction and support material. However, in nature, it does not always reach the resistance values required to execute different types of projects. In these cases, it is essential to consider the possibility of seeking alternative solutions. These solutions consist of exploring new areas, as well as improving existing soil, through the insertion of chemical agents, such as cement and lime. Therefore, the present study aims to evaluate chemical stabilization through the insertion of 8% lime into the clayey soil of Campo Mourão. To this end, tests of particle size analysis, real grain mass, x-ray fluorescence, dosing pH method, compaction and unconfined compressive strength test (UCS) were carried out, evaluating curing times of 3, 7 and 28 days, considering the experimental conditions with and without immersion of the specimens in water. From the results, it was observed that the pH method was not efficient in obtaining the amount of lime necessary to stabilize the soil, due to the significant presence of iron and aluminum in the material. In relation to compaction, the inclusion of lime caused the maximum apparent dry mass to decrease and the optimum moisture content to increase, due to the low density of the lime and its high specific surface. In relation to UCS, it can be observed that the resistance increased with the inclusion of lime and the curing periods did not influence the response, with constant values after 3 days.

Keywords: stabilization; soil-lime; pH method; clay soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação do índice de plasticidade	15
Figura 2 - Sistema Unificado de Classificação de Solo.....	17
Figura 3 - Sistema de Classificação AASHTO.....	18
Figura 4 - Curva de Compactação	19
Figura 5 - Vista superior do local de coleta do material	23
Figura 6 - Cal hidratada CH III.....	24
Figura 7 - Fluxograma dos processos	24
Figura 8 - Preparação do solo: (a) bandeja; (b) destorroamento; (c) solo destorroadado e; (d) armazenamento.....	25
Figura 9 - Ensaios: (a) e (b) sedimentação; (c) peneiramento; (d) massa específica dos sólidos.....	26
Figura 10 - Amostra de cal e solo.	27
Figura 11 - (a) Amostras para o teste de pH e (b) teste do pH	28
Figura 12 - Armazenamento dos corpos de prova.....	29
Figura 13 - (a) Cápsulas; (b) Amostra bandeja; (c) estufa	29
Figura 14 - (a) Mistura solo-cal; (b) extração do corpo de prova; (c) corpo de prova; (d) imersão dos corpos de prova; (e) pesagem e; (f) ensaio mecânico	30
Figura 15 - Curva granulométrica	34
Figura 16 - Curva de compactação do solo	36
Figura 17 - Curva de compactação da mistura solo-cal.....	36
Figura 18 - RCS em função do tempo de cura.....	39

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Identificação da amostra de solo	32
Tabela 2 - Identificação da amostra de cal.....	32
Tabela 3 - Ensaio picnômetro para massa específica dos sólidos que constituem o solo .	32
Tabela 4 - Resultado do teste do pH	35
Tabela 5 - Corpos de prova rompidos com 3 dias	37
Tabela 6 - Corpos de prova rompidos com 7 dias	38
Tabela 7 - Corpos de prova rompidos com 28 dias	38
Quadro 1 - Resultado do ensaio de peneiramento	33
Quadro 2 - Resultados do ensaio de sedimentação.....	33
Quadro 3 - Representação do teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima .	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CC	Coeficiente de Curvatura
CH-I	Cal Hidratada
CNU	Coeficiente de Não Uniformidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
GC	Grau de Compactação
LAMAP	Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa
NBR	Norma Brasileira
RCS	Resistência à Compressão Simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

pH	Potencial Hidrogeniônico
$\rho_{dmáx}$	Massa específica aparente seca máxima
$\omega_{ót}$	Teor de Umidade Ótimo
ρ	Massa específica aparente do solo compactado
M	Massa do solo compactado
V	Volume do molde
ρ_d	Massa específica aparente seca do solo compactado
ρ_s	Massa específica do solo na temperatura a 20°
$\rho_{(s)médio}$	Valor médio da massa específica dos sólidos do solo
ω	Teor de umidade do solo compactado
CaO	Óxido de cálcio
SiO ₂	Quartzo
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
Al	Alumínio
Si	Silício
P	Fósforo
Ti	Titânio
V	Vanádio
Mn	Manganês
Fe	Ferro
Cu	Cobre
S	Enxofre
K	Potássio
Ca	Cálcio
Sr	Estrôncio
t	Tempo
L	Leitura no densímetro
T	Temperatura
h	Altura de queda
ρ_w	Massa específica da água
Lc	Leitura corrigida
μ	Viscosidade do fluido
D	Diâmetro dos grãos passantes
P	Material passante em porcentagem
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
Abs	Absorção de água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1	Caracterização do solo	13
3.1.1	Granulometria	14
3.1.2	Índices de consistência	14
3.2	Classificação do solo	15
3.2.1	Sistema Unificado de Classificação do Solo	16
3.2.2	Sistema de classificação AASHTO	17
3.3	Compactação	18
3.4	Estabilização do solo.....	19
3.4.1	Cal.....	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Materiais	23
4.2	Métodos.....	24
4.2.1	Preparação da amostra de solo.....	24
4.2.2	Caracterização física e classificação do solo	25
4.2.3	Definições da condição de ensaio.....	27
4.2.4	Obtenção dos parâmetros de compactação	28
4.2.5	Moldagem dos corpos de prova.....	29
4.2.6	Determinação de resistência à compressão simples	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1	Caracterização dos materiais e classificação do solo.....	32
5.2	Teste de pH e teor de cal	34
5.3	Compactação	35
5.4	Resistência à compressão simples	37
6	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos materiais mais empregados na engenharia civil, sendo um componente fundamental que exerce influência significativa em suas diversas aplicações. Devido à variação dos parâmetros e complexidade do comportamento, nem sempre atende às necessidades para a execução de uma obra. Um exemplo relevante, conforme mencionado por Rosa (2009), é evidenciado no âmbito da pavimentação. Solos com limitada capacidade de suporte e altos níveis de umidade demandam a incorporação de bases granulares, acarreta custos consideráveis em virtude da distância das fontes de extração, bem como do impacto ambiental inerente à exploração dos recursos naturais e ao transporte desses materiais até o local de destino.

Face a essas características distintivas, torna-se imprescindível recorrer a intervenções de estabilização e modificação do solo, como o uso da adição de cal, cinzas pozolânicas e cimento, com o intuito de viabilizar sua utilização e melhorar os parâmetros. No estudo realizado por Barbosa (2013), foi constatado que a estabilização do solo pode ser realizada por meio de duas abordagens principais: a estabilização mecânica e a estabilização química. Além disso, considerações sobre fatores economicamente viáveis, o tipo de obra a ser executada e as características específicas a serem modificadas desempenham um papel fundamental na escolha do método de estabilização mais apropriado.

A estabilização de solos argilosos é um desafio recorrente na engenharia civil. Isso ocorre porque esses solos apresentam parâmetros indesejáveis como alta plasticidade, baixa capacidade de carga, alta compressibilidade e é suscetível a expansão e contração devido a mudanças no teor de umidade.

Um dos métodos amplamente adotados para o tratamento de solos argilosos é a estabilização química, que envolve a incorporação de cal, tema central deste estudo. A cal é um aglomerante aéreo obtido por meio da calcinação de calcários ou dolomíticos, que passam por um processo de decomposição térmica seguido de hidratação, resulta no hidróxido de cálcio, que, quando incorporado ao solo, provoca modificações no pH. O cálcio presente age na neutralização das cargas negativas dos argilominerais, restringi o acesso da água aos espaços vazios existentes no solo. Além disso, favorece a troca catiônica e estimula o processo de floculação (Barbosa, 2013).

O material a ser estudado é o solo argiloso da região de Campo Mourão, com a finalidade de entender o comportamento do solo frente a estabilização química com cal para fins geotécnicos.

2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento mecânico do solo argiloso de Campo Mourão estabilizado com a adição de cal.

2.2 Objetivos específicos

Para que se cumpra o objetivo geral, se estabelecem como objetivos específicos:

- verificar a eficiência do método pH na dosagem;
- avaliar o efeito de inserção de cal na resistência à compressão simples do solo;
- analisar o efeito do período de cura no comportamento mecânico da mistura.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O solo é um material de grande relevância na engenharia civil, visto que é amplamente utilizado na construção de diversas estruturas. Para que se obtenha um melhor desempenho dessas estruturas, é fundamental compreender as características e propriedades do solo, tais como a resistência e suporte.

De acordo com a definição, o solo é composto por um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta, preenchidos por líquidos e gases nos espaços vazios entre as partículas sólidas. O conhecimento das propriedades do solo, incluindo sua origem, disposição dos grãos, capacidade de drenagem, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de suporte, é crucial para a aplicação dos conceitos de Mecânica dos Solos em diversas obras (Das, 2017).

Os solos são formados a partir do intemperismo das rochas, o que se refere à desintegração provocada por agentes físicos e decomposição, provocada por agentes químicos, como a oxidação, hidratação e carbonatação. A decomposição do solo é um processo contínuo e complexo, sendo que as argilas representam o último componente resultante da transformação (Caputo, 2012).

A estrutura do solo pode ser compreendida como o padrão de organização das partículas em relação umas às outras. Tal modelo pode ser modificado por vários fatores, dentre eles, a forma, a formação mineralógica, tamanho, composição da água existente no solo e natureza.

Dada a sua complexidade, surgiram sistemas de classificação do solo a fim de prever seu comportamento em obras geotécnicas a partir de propriedades físicas, discutidas na sequência.

3.1 Caracterização do solo

A caracterização do solo é fundamental para engenharia e desenvolvimento de projetos, uma vez que proporciona informações importantes acerca das propriedades e comportamento do solo. A caracterização é composta por ensaios e teste desenvolvidos em campo ou laboratório, com o intuito de analisar informações acerca das características físicas, hidráulicas e mecânicas dos solos, abrangendo sua composição, estrutura, permeabilidade, compactação, resistência e deformidade, entre outras propriedades importantes, sendo composta pela granulometria e índices de consistência.

3.1.1 Granulometria

De acordo com Caputo (1988), a granulometria do solo é o estudo da distribuição das dimensões das partículas que compõem o solo, estabelecendo limites convencionais para cada fração constituinte. Essas frações são designadas de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo denominado de pedregulho o material composto por partículas com diâmetros semelhantes, entre 60 e 2,0 mm; a areia entre 2,0 e 0,06 mm; o silte entre 0,06 e 0,002 mm e a argila inferior a 0,002 mm.

A análise granulométrica é o estudo do tamanho das partículas e seu percentual presente no solo. O estudo é desenvolvido por meio da curva granulométrica, a qual identifica a porcentagem acumulada de partículas em relação ao tamanho e diâmetro. Sendo assim, a análise granulométrica no processo de caracterização do solo permite identificar a composição granular e classificar de acordo com essa composição. De acordo com as informações obtidas na análise granulométrica, é possível classificar texturalmente os solos em areia, cascalho, silte, argila etc. (Caputo, 2012).

O entendimento da granulometria auxilia na compreensão das propriedades geotécnicas, como compactação, estabilidade, capacidade de suporte e permeabilidade. Assim sendo, a granulometria desenvolve uma importância fundamental para o conhecimento desses comportamentos e o uso ou aplicação dos solos de forma adequada.

Nesse sentido, a análise granulométrica é composta de dois métodos para se obter a curva de distribuição granulométrica, referente aos ensaios de peneiramento e de sedimentação. O ensaio de peneiramento é baseado na agitação da porção de solo em um grupo de peneiras que contém aberturas gradativamente inferiores ao tamanho dos grãos de solo (Das, 2017). Já o ensaio de sedimentação consiste em determinar o tamanho das partículas passantes na 0,075 mm com base na Lei de Stokes a partir da suspensão das partículas em meio líquido e medida da densidade da solução em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

3.1.2 Índices de Consistência

De acordo com a variação das propriedades do solo, o cientista Atterberg desenvolveu um método que consiste em descrever as características da parte fina do solo em relação aos diferentes teores de umidade. Em solos com alto teor de umidade, tanto a água quanto o solo têm a capacidade de fluir de forma líquida, enquanto em solos com baixo teor de umidade, o solo se comporta de maneira sólida. Dessa forma, com base no comportamento e teor de

umidade solo, é possível classificá-lo em quatro estados distintos: sólido, semissólido, plástico e líquido (Das, 2017).

O limite de liquidez do solo avalia o teor de umidade no qual o solo transita do estado plástico para o estado líquido. É determinado por meio do ensaio Casagrande, que consiste em uma amostra homogênea de solo com água, disposta em uma concha, na qual é feita uma abertura e submetida a uma determinada quantidade de golpes para avaliar sua capacidade de fechamento (Das, 2017).

O limite de liquidez tem como finalidade verificar a resistência do solo após o fechamento do sulco, em relação à quantidade de golpes aplicados, a fim de avaliar sua resistência ao cisalhamento de acordo com a umidade obtida no solo (Caputo, 2012). O ensaio é realizado seguindo a Norma Brasileira da NBR 6459 (ABNT, 2016).

O limite de plasticidade é determinado mediante a avaliação da porcentagem de umidade na qual o solo passa a fragmentar-se ao ser submetido a manipulação, sendo um cilindro de diâmetro aproximado de 3 mm e comprimento de 10 (Caputo, 2012). A norma que estabelece as diretrizes para a realização do procedimento é a NBR 7180 (ABNT, 2016).

O índice de plasticidade é uma medida quantitativa que delimita a faixa de umidade na qual o solo pode ser moldado, assim como descrito em Figura 1. É determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Sua finalidade reside na obtenção de informações sobre a capacidade de deformação do solo e na correlação com suas propriedades de plasticidade, além de estar relacionado ao índice de fluidez, que se baseia no limite de liquidez.

Figura 1 - Classificação do índice de plasticidade

<i>IP</i>	Descrição
0	Sem plasticidade
1-5	Plasticidade leve
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: Das (2017, p. 78)

3.2 Classificação do solo

Em alguns solos que possuem características comparáveis podem ser categorizados em grupos e subgrupos, em relação ao comportamento. O Sistema de classificação tem como objetivo oferecer um dialeto compreensível para que seja apresentada as propriedades dos solos de forma sucinta, sem muitos detalhes e de variadas formas. A maior parte dos sistemas de

classificação foram criados com suportes em indícios básicos, como o estudo de granulometria e limite de plasticidade do solo (Das, 2017).

Os sistemas de classificação mais usuais são o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), voltado para a área da pavimentação.

3.2.1 Sistema Unificado de Classificação do solo

O sistema de classificação foi desenvolvido inicialmente por Casagrande em 1942 para auxiliar nos estudos de construção na aviação, ao longo da Segunda Guerra Mundial. Em conjunto com o Escritório de Recuperação dos Solos, foi realizada a atualização em 1952, estando vigente atualmente segundo a *American Society for Testing and Materials* – ASTM D-2487 (2019). O sistema de classificação é exposto na Figura 2 (DNIT, 2006).

A metodologia SUCS possui basicamente duas classificações, divididas em solos grossos e finos. Os solos de granulometria grossa, como pedregulho e areia, podem ser classificados com base na porcentagem de material passante na peneira número 200, onde menos de 50% do solo passa por essa peneira. A classificação desses solos é indicada pelas letras G ou S. A letra G refere-se a solos com presença de pedregulho ou solos contendo pedregulhos, enquanto a letra S é utilizada para solos arenosos ou de composição predominantemente arenosa (Das, 2017). Além disso, há algumas simbologias adicionais que são utilizadas, como W para solos bem graduados, P para solos mal graduados, conforme os parâmetros de Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e Coeficiente de Curvatura (CC).

Os solos de granulometria fina possuem pelo menos 50% do material passante na peneira de número 200. A classificação dos solos finos é representada por símbolos como mostra na Figura 2 (Das, 2017).

Figura 2 - Sistema Unificado de Classificação de Solo

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT (2006, p. 59)

3.2.2 Sistema de Classificação AASHTO

No sistema de classificação *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, os solos são classificados em grupos e subgrupos, em relação a plasticidade e granulometria. Os solos granulares compõem os grupos A-1, A-2 e A-3, enquanto os solos finos se encaixam nos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, fragmentados em três subgrupos. Na Figura 3 são indicados os grupos, os respectivos materiais e a previsão de comportamento como subleito (DNIT, 2006).

Figura 3 - Sistema de Classificação AASHTO

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006, p. 56)

3.3 Compactação

A compactação do solo consiste na densificação do material através da eliminação do ar presente nos vazios do solo, sendo um processo que demanda a aplicação de força mecânica. Considerando-se o peso específico seco do solo, é possível determinar o seu grau de compactação (GC). A água acrescentada no decorrer da compactação realiza o papel responsável pela lubrificação dos elementos sólidos. As partículas do solo interagem através do ordenamento relativo entre si, resultando em uma maior densificação do material. Em sequência a compactação, o peso específico seco do solo se eleva, por consequência há um aumento do teor de umidade. (Das, 2017).

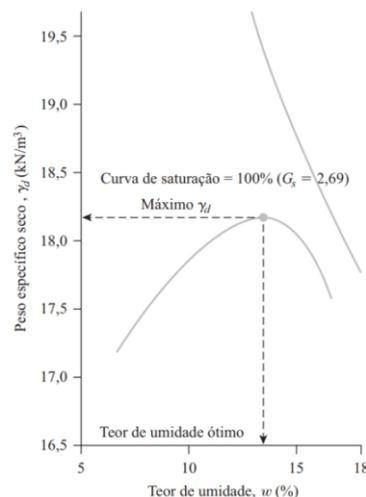
À medida que o nível de umidade é progressivamente elevado sob a constância da força de compactação, observa-se um aumento gradual no peso dos grãos, em relação à densidade do solo. A partir de um teor de umidade específico, qualquer incremento adicional no teor de umidade resulta em uma diminuição no peso específico seco do solo. Esse fenômeno

acontece em decorrência da ocupação dos espaços vazios anteriormente preenchidos pelas partículas sólidas pelo acréscimo da água (Das, 2017).

O ensaio para a determinação do teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo em relação compactação é o Ensaio Proctor, que envolve a preparação de uma amostra de solo com água, seguida da inserção desta mistura em um cilindro com colarinho. A compactação é realizada em três camadas, cada uma submetida a 26 golpes com um soquete de altura padronizado. O ensaio é realizado cinco vezes e para cada corpo de prova compactado são determinados o peso específico seco e o teor de umidade. Com a obtenção desses valores, é plotado o gráfico da curva de compactação, por meio da qual se obtém o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima (Das, 2017).

O ensaio de Proctor é realizado de acordo as diretrizes presentes na Designação de Ensaio D-698 da ASTM (2014) e na Designação de ensaio T-99 da AASHTO (1982).

Figura 4 - Curva de Compactação



Fonte: Das (2017, p. 118)

3.4 Estabilização do solo

Em virtude das variações e similaridades nos processos e mecanismos empregados para a estabilização de solos, utiliza-se a resistência transmitida ao solo como um parâmetro para a categorização dos métodos de estabilização. Dessa maneira, podem ser mencionados os seguintes tipos de estabilização: mecânica, granulométrica e química. Esta classificação baseia-se nos diferentes meios pelos quais a energia é aplicada ao solo com o objetivo de promover a sua estabilização (Marques, 2012).

A estabilização mecânica tem como objetivo conferir maior contato entre os grãos do solo ou sua composição, a fim de obter maior densificação na camada do pavimento. Além disso, a estabilização por meio da compactação, trata-se de um método essencial na construção

das diferentes camadas do pavimento, atuando de forma complementar com os diversos métodos de estabilização (Marques, 2012).

Crispim (2007) conduziu um estudo sobre a estabilização mecânica por meio de ensaios dinâmicos, onde foram avaliadas diversas variáveis, tais como o número de camadas de cada corpo de prova, o raio do cilindro de compactação (35 mm, 73 mm e 100 mm), o teor de umidade e a energia dos ensaios utilizados para determinar os parâmetros de compactação em laboratório. O estudo foi realizado em dois tipos de solos residuais distintos na região da Mata Norte de Minas Gerais. Os resultados indicaram variações na resistência dos solos em função dos diferentes métodos de compactação utilizados, demonstrando alterações estruturais decorrentes do ensaio de compactação. Além disso, observou-se a influência do número de golpes aplicados em cada corpo de prova.

A estabilização granulométrica é a modificação das características dos solos por meio da inserção ou retirada de componentes do solo. Esse processo envolve a utilização de um componente ou a combinação de dois ou mais componentes de acordo com especificações pré-definidas (Marques, 2012).

No estudo conduzido por Rodrigues (2018), foi realizado um processo de estabilização granulométrica, visando a utilização de resíduos industriais, especificamente as espirais resultantes do beneficiamento de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero, em conjunto com dois solos distintos. Diferentes proporções desses materiais foram incorporadas na mistura, representando 0%, 10%, 20% e 30% em relação à massa total da mistura. Em seguida, foram conduzidos ensaios de caracterização e resistência, utilizando os sistemas de classificação convencionais, como SUCS e AASHTO. Os resultados obtidos demonstraram um aumento significativo na massa específica aparente seca máxima, além dos ensaios de resistência à compressão simples, CBR e outros realizados no contexto do projeto, em função da variação da porcentagem de rejeito.

Já a estabilização química, é o processo que consiste em alterar a estrutura do solo por meio da adição controlada de aditivos, com o intuito de aprimorar as propriedades mecânica e físicas do solo (França, 2003).

Quando é empregada em solos granulares, tem como principal objetivo aprimorar a resistência ao cisalhamento por meio do efeito cimentante, no contato entre as partículas. Isso é obtido mediante a adição de quantidades reduzidas de ligantes nos locais de aderência dos grãos. Dentre os ligantes mais comumente utilizados estão o cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, entre outros (Marques, 2012).

Nos solos argilosos, que são de natureza coesiva, possui diversos arranjos floculados e espalhados que são mais suscetíveis à influência da água, o que afeta a resistência ao cisalhamento. Neste caso, é frequente a utilização de aditivos químicos que promovem o espalhamento ou floculação dos grãos, para obter propriedades adequadas do solo (Marques, 2012).

3.4.1 Cal

A cal é um ligante obtido por meio de um processo químico, desenvolvido por meio da calcinação das rochas carbonatadas que contêm principalmente carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio magnésio. De acordo com Guimarães (2002), esse processo resulta na formação do óxido de cálcio (CaO) a partir dos carbonatos de cálcio e do óxido de cálcio-magnésio, que são conhecidos de maneira genérica como cal virgem ou viva.

Segundo Sartori (2015) a cal hidratada é amplamente empregada na indústria da construção civil como um aditivo de elevada finura, baixa densidade e um bom custo-benefício. A utilização e aplicação desse aditivo em solos, visando as estabilizações, decorre da boa reatividade, resultando na impermeabilização do solo e na viabilização do uso em bases de pavimentos de modo geral. Tal abordagem promove uma relação de custo-benefício, ao otimizar a utilização do solo e proporciona maior resistência a cargas e ações climáticas.

No âmbito da engenharia, o solo assume um papel de grande importância, tornando-se imperativo compreender as suas propriedades, a fim de garantir a sua utilização apropriada. Em virtude das suas características físicas e mecânicas, bem como do propósito ao qual o solo é destinado, a adição de cal se revela uma medida vantajosa e econômica, visando conferir resistência e eficiência ao solo estabilizado

Existem várias propriedades que exercem influência na estabilização do solo-cal, e é nesse contexto que Silva (2010) destaca a necessidade de examinar cuidadosamente algumas dessas propriedades, tais como os processos de estabilização e modificação granulometria e solubilidade.

A estabilização e a modificação do solo são as duas principais formas de melhorar as propriedades do solo quimicamente. Inicialmente, a modificação ocorre devido às interações químicas entre a cal e as partículas do solo argiloso, onde a adição de cal aumenta a resistência e se torna benéfica ao solo argiloso. Sendo assim, devido a essas interações há um aumento na trabalhabilidade do solo, redução do teor de água, capacidade expansiva e plasticidade do solo (Neves, 2009).

A reatividade que ocorre entre o solo e a cal é denominada de estabilização. A principal característica entre os processos citados é que na modificação ao longo do tempo, há um aumento significativo nas propriedades devido às ligações desenvolvidas com as reações pozolânicas.

No trabalho conduzido por Marinho, Carvalho (2021), foi realizado a estabilização do solo tropical com adição de cal CH-I, variando entre 2% e 5%, e com tempos de cura de 1 e 28 dias. Os resultados revelaram que, em grande parte dos casos, a incorporação da cal contribuiu para o aumento da umidade ótima, a redução do peso específico aparente seco máximo e elevou-se os valores de pH, além de promover uma maior agregação com o aumento da quantidade de cal utilizada.

A estabilização solo com cal também se faz presente no estudo de Kleinert (2021). Além de investigar um tempo de cura maior e variações de 3% e 5%, o estudo analisou a eficácia de dois tipos de cal, a dolomítica e a calcítica, para determinar qual proporcionava uma resistência superior em solos tropicais que exigem bases granulares. Os resultados obtidos revelaram que a estabilização com cal calcítica fortaleceu notavelmente a capacidade estrutural do solo em comparação a cal dolomítica. Observou-se que o aumento na adição de cal resulta em benefícios significativos no comportamento mecânico do solo

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos para desenvolvimento deste trabalho.

4.1 Materiais

O solo utilizado para a realização dos ensaios em laboratório foi coletado no *Campus* da UTFPR de Campo Mourão como mostrado na Figura 5. Segundo o estudo realizado por Batelo (2019), quanto as características do solo, destaca-se a predominância do latossolo roxo, que possui textura argilosa, considerado profundo, altamente fértil e adequado para a prática intensiva da agricultura na região.

Figura 5 - Vista superior do local de coleta do material



Fonte: Google Maps (2023)

A cal utilizada foi a cal hidratada – CH III, com especificações e propriedades que atendem aos requisitos da NBR 7175 (ABNT, 2003), disponível no laboratório de materiais como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Cal hidratada CH III



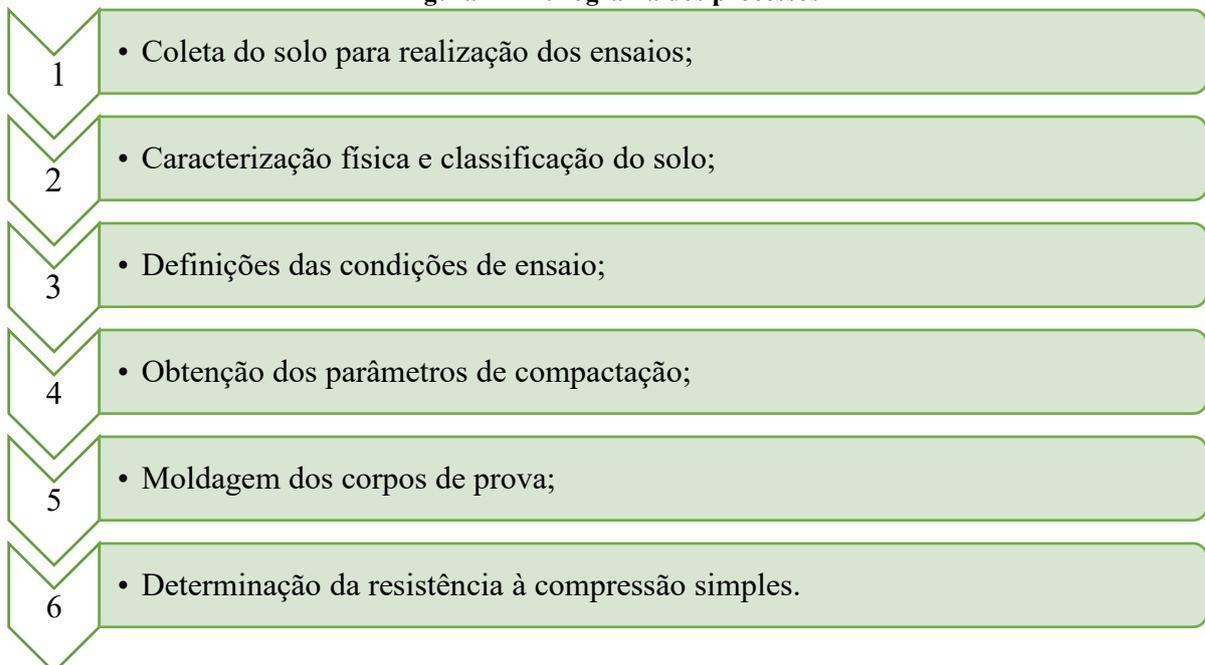
Fonte: Autoria própria (2023)

Nos ensaios de caracterização foi utilizada a água destilada. Já para a moldar os corpos de prova, foi utilizada água potável proveniente do sistema público de abastecimento.

4.2 Métodos

Com o objetivo de atender aos propósitos estabelecidos, algumas etapas para o desenvolvimento deste trabalho, foram definidas e estão apresentadas na Figura 7. As etapas desse processo são detalhadas nos itens subsequentes deste estudo.

Figura 7 - Fluxograma dos processos



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.1 Preparação das amostras de solo

O solo foi coletado e preparado seguindo as diretrizes preconizadas pela NBR 6457 (ABNT, 2016), que estabelece os parâmetros e métodos de referência para a preparação do

material. Em seguida, o solo foi distribuído em bandejas de aço para o processo de secagem ao ar. Posteriormente, procedeu-se o destorroamento do material por meio do uso de almofariz e mão de gral seguido pela utilização de bandejas plásticas para facilitar a distribuição do solo. Na sequência, foi armazenado em um tambor devidamente vedado com plástico, com a finalidade de reduzir a transferência de umidade e preservar o material (Figura 8).

Figura 8 - Preparação do solo: (a) bandeja; (b) destorroamento; (c) solo destorroadado e; (d) armazenamento



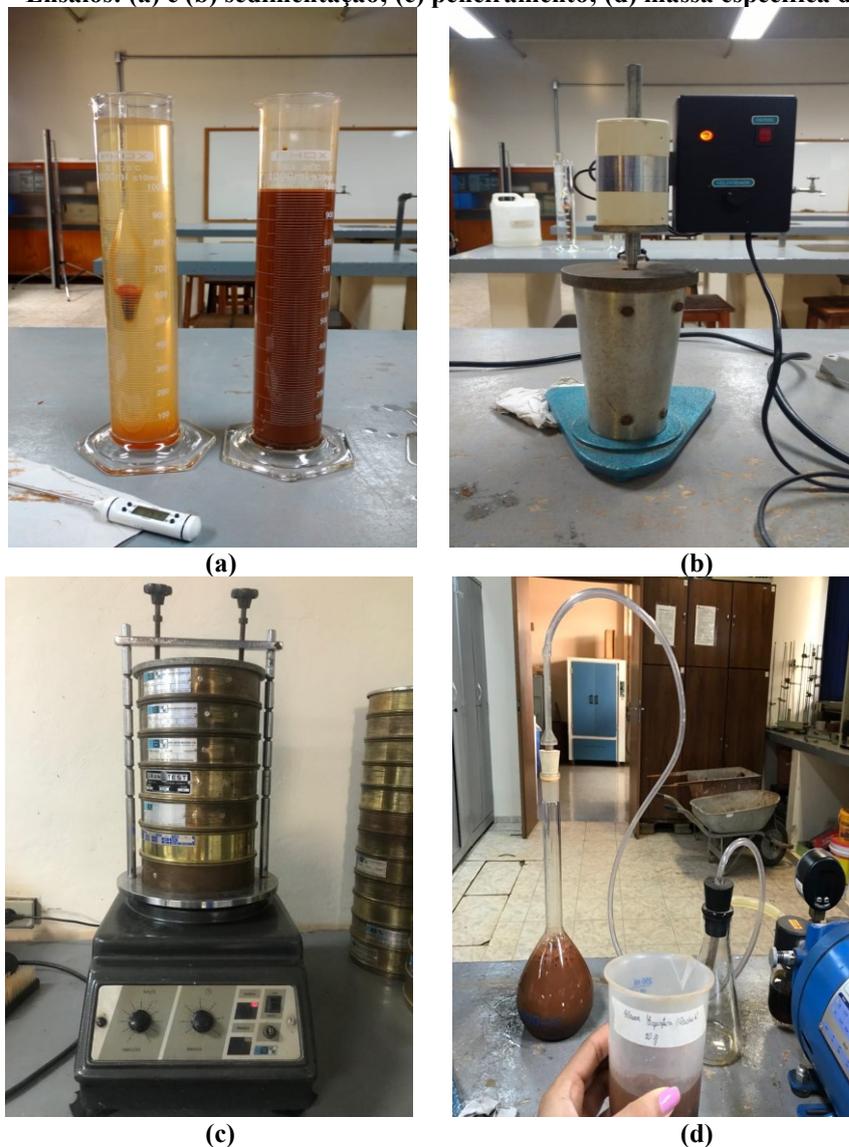
Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.2 Caracterização física e classificação do solo

Logo após a preparação das amostras, foram realizados ensaios de caracterização do material, composto pela análise granulométrica conjunta, envolvendo sedimentação e peneiramento fino NBR 7181 (ABNT, 2016), bem como a massa específica dos sólidos determinada pela NBR 6458 (ABNT, 2016) (Figura 9).

Para a determinação da massa específica das partículas, duas amostras de 50 g foram separadas. Em seguida, o solo foi colocado em um recipiente de vidro com água destilada, onde ficou por um período de 24 horas. Depois da imersão, a mistura de solo com água foi colocada no copo dispersor por 15 minutos. Posteriormente a mistura foi colocada em um picnômetro calibrado com o auxílio de um funil o picnômetro e foi preenchido até a metade do seu volume. O processo de retirada de ar da mistura foi realizado com a ajuda de uma bomba e vácuo, que durou entorno de 15 minutos. E esses processos foram repetidos duas vezes. Por fim, adicionou-se água destilada até a marca de referência do picnômetro para só então fazer a medição de temperatura e massa do picnômetro mais o solo.

Figura 9 - Ensaios: (a) e (b) sedimentação; (c) peneiramento; (d) massa específica dos sólidos



Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos dados derivados da análise granulométrica e dos limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), efetuou-se a classificação do solo utilizando os

padrões estabelecidos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), conforme ASTM D 3282 (1993).

Além disso, foram realizados ensaios de fluorescência de raios-x para identificar os principais elementos químicos presentes nos materiais, envolvendo uma amostra de solo e outra de cal contendo 10 g cada e passantes na peneira nº 200 foram separadas e encaminhadas ao Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa (LAMAP), da UTFPR no *Campus* de Apucarana como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Amostra de cal e solo.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.3 Definições das condições de ensaios

A norma do DNIT 419 (2019) tem como objetivo estimar o teor de cal necessário para estabilização do solo. Também conhecida como método do pH, sugerido por Eades e Grim (1966), consiste em medir o pH do solo com variação do teor de cal, com o intuito de alcançar o valor de pH igual a 12,4, estabelecido como o teor mínimo para estabilizar o solo. O método avalia o pH da mistura solo-cal com água, demonstra assim a quantidade de cal adequada para obter a otimização da mistura. Essa mistura, em decorrência da dosagem, é denominada de ponto fixo da cal, em que a adição de cal resulta em um aumento das reações pozolânicas, até alcançar um limite que estabiliza a mistura de maneira controlada.

Para a análise do pH, foram adotados os teores de cal de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em relação a massa de solo seco, a qual foi de 25 g, previamente passante na peneira nº 40, assim como uma mistura sem solo e com 2 g de cal, considerada referência. Logo depois, a mistura foi colocada em um recipiente de vidro com 100 ml de água destilada com tampa e identificação como mostrado na Figura 11. A agitação da mistura foi realizada por 30 segundos, com

intervalos de 10 minutos para se obter uma mistura homogênea. Após 1 hora da conclusão do processo, foram registrados os valores de pH para cada amostra.

Figura 11 - (a) Amostras para o teste de pH e (b) teste do pH



Fonte: Autoria própria (2023)

As mensurações foram conduzidas por meio de um medidor de pH modelo PHS-3E de bancada, equipado com compensação automática de temperatura e eletrodo de vidro. O aparelho foi devidamente calibrado com soluções tampão de pH 7 e 10.

4.2.4 Obtenção dos parâmetros de compactação

Os parâmetros obtidos a partir do ensaio de Proctor são a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) e do teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$). A partir desses parâmetros, é possível plotar a curva de compactação, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando energia normal de Proctor.

Foi utilizado o cilindro pequeno, e um soquete com uma altura de queda de 305 mm e foram aplicados 26 golpes em cada uma das três camadas.

A massa específica aparente do solo compactado (ρ) é obtida por meio do cálculo apresentado na Equação 1. Nessa equação, a massa do solo compactado (M) é dividida pelo volume do corpo de prova do solo (V).

$$\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{M(g)}{V(cm^3)} \quad (\text{Equação 1})$$

A massa específica aparente seca do solo compactado é determinada por meio da Equação 2. Nessa equação, o símbolo (ρ_d) representa a massa específica aparente seca do solo compactado, enquanto o símbolo (ω) denota o teor de umidade do solo compactado.

$$\rho_d\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right)}{1+\omega} \quad (\text{Equação 2})$$

4.2.5 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 12024 (ABNT, 2012), com ensaios conduzidos em triplicata para cada condição experimental e três diferentes períodos de cura, isto é 3, 7 e 28 dias. É pertinente ressaltar que os corpos de prova foram devidamente armazenados em sacos plásticos, de acordo com a Figura 12 e colocados na câmara úmida durante o processo de cura, com umidade relativa do ar mantida em 95% ou superior. Além disso, adotou-se como controle de compactação o grau de compactação - $GC \geq 95\%$ e variação do teor de umidade ótima de $\pm 2\%$.

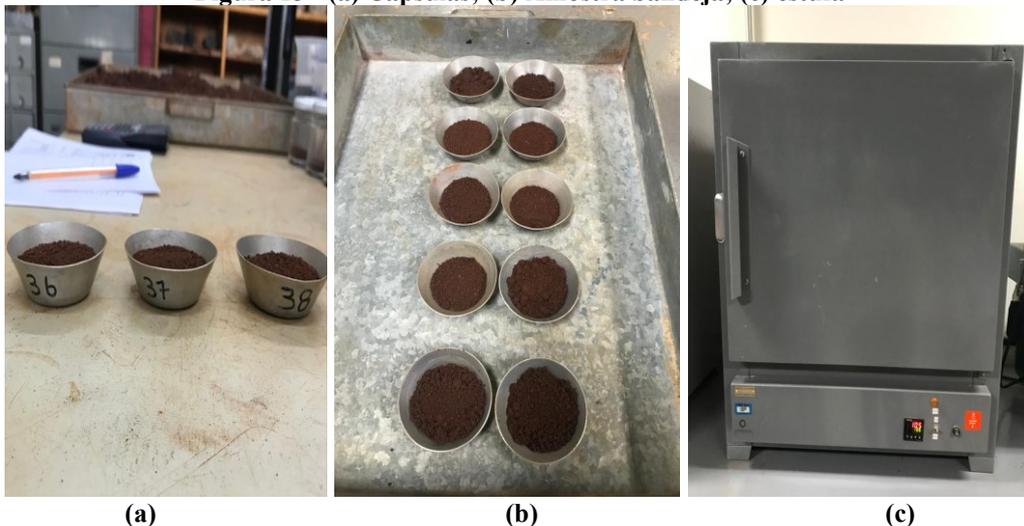
Figura 12 - Armazenamento dos corpos de prova



Fonte: Aatoria própria (2023)

Foram coletadas três amostras de cada corpo de prova, onde cerca de 70% a capacidade da forma. A forma foi inicialmente pesada vazia e, em seguida, como o solo. Posteriormente, as amostras foram transferidas para uma bandeja de aço de maior dimensão, e colocadas na estufa por 24 horas a uma temperatura de 105° para a secagem (Figura 13). Após esses processos, as amostras foram pesadas novamente, e com esses dados foi possível calcular o teor de umidade de solo cada uma das amostras. Em seguida, os dados foram inseridos em uma planilha de Excel, para determinar os pontos de teor de umidade ótimo.

Figura 13 - (a) Cápsulas; (b) Amostra bandeja; (c) estufa



(a)

(b)

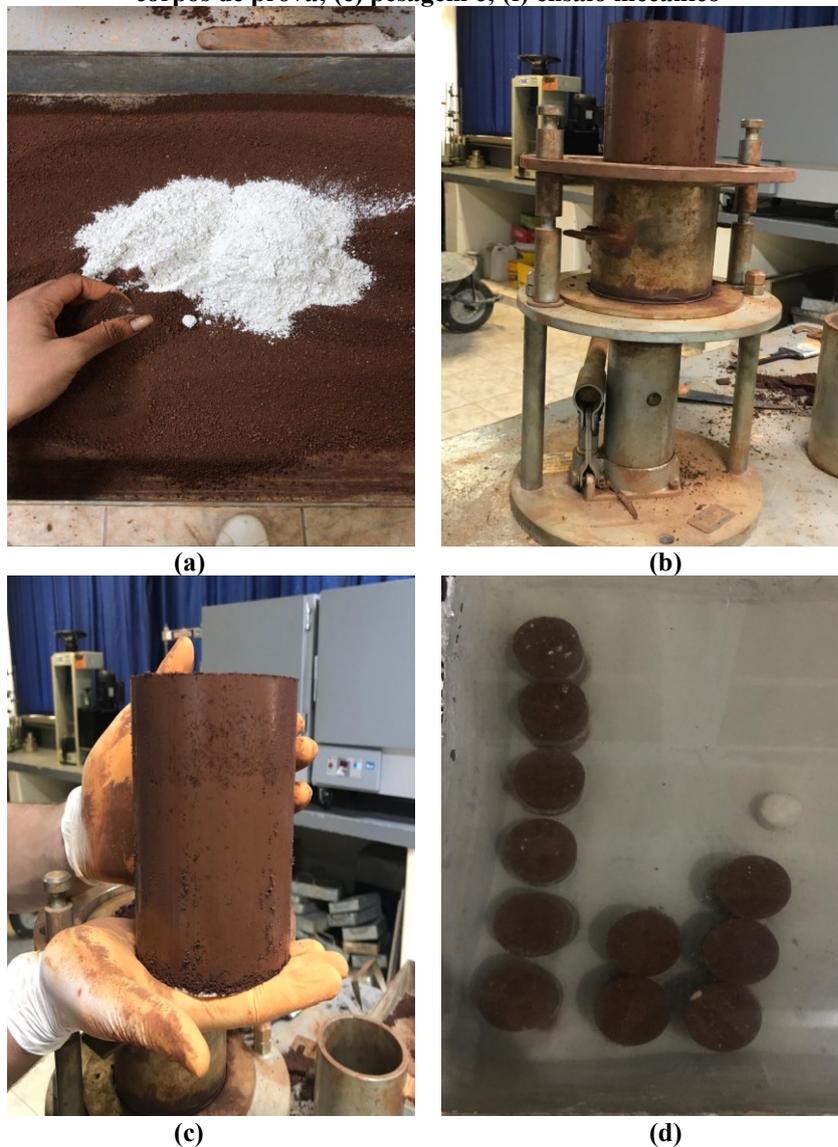
(c)

Fonte: Aatoria própria (2023)

4.2.6 Determinação de resistência à compressão simples

A fim de determinar a resistência à compressão simples, a metodologia estabelecida na NBR 12025 (ABNT, 2012) foi adotada. Com o período de cura, dois dos corpos de prova moldados foram submersos em um tanque com água por 4 horas, e o terceiro foi rompido diretamente sem passar por essa etapa, a fim de analisar o efeito da absorção água na resistência das misturas. Posteriormente, foram retirados, pesados e finalmente submetidos ao ensaio mecânico, por meio de uma prensa de compressão simples (Figura 14).

Figura 14 - (a) Mistura solo-cal; (b) extração do corpo de prova; (c) corpo de prova; (d) imersão dos corpos de prova; (e) pesagem e; (f) ensaio mecânico





(e)



(f)

Fonte: Autoria própria (2023)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são abordados os resultados obtidos por meio de pesquisas e ensaios realizados, bem como as discussões referentes aos resultados obtidos ao longo do trabalho.

5.1 Caracterização dos materiais e classificação do solo

Conforme a Tabela 1, a análise de fluorescência de raios-x do solo revelou que os elementos químicos mais relevantes presentes no solo são o ferro (Fe), alumínio (Al) e silício (Si), correspondentes aos percentuais de 53,9%, 22,7% e 16,6%, respectivamente. A partir dessa composição química e considerando-se que o processo de formação dos solos de Campo Mourão e Londrina foi semelhante, é de se esperar que os minerais presentes no solo são o quartzo [SiO₂], óxido de ferro [Fe₂O₃] e caulinita [Al₂(Si₂O₅)(OH)₄], conforme observações de Gonçalves *et al.* (2018).

Tabela 1 - Identificação da amostra de solo

Composição	Al	Si	P	Ti	V	Mn	Fe	Cu
Unidade	%	%	%	%	%	%	%	%
Concentração	22,740	16,553	0,375	5,949	0,213	0,210	53,856	0,104

Fonte: Autoria própria (2023)

Já no caso da cal como mostra a Tabela 2, observa-se que 95,6% de concentração diz respeito à presença de cálcio (Ca), o que serve de indicativo da pureza do material.

Tabela 2 - Identificação da amostra de cal

Composição	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Sr
Unidade	%	%	%	%	%	%	%	%
Concentração	1,261	3,510	0,174	0,404	95,592	0,214	1,567	0,277

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio de massa específica dos sólidos que constituem o solo.

Tabela 3 - Ensaio picnômetro para massa específica dos sólidos que constituem o solo

Determinação	1	2	
$\rho_s (20)$	(g/cm ³)	3,27	3,21
$\rho_s (20)$ médio	(g/cm ³)	3,24	
Desvio-padrão	(g/cm ³)	0,04	
Coefficiente de variação (CV):		1,23%	

Fonte: Autoria própria (2023)

Quanto à análise granulométrica, no Quadro 1 é apresentado o ensaio de peneiramento fino, considerando a numeração de peneiras e porcentagem de materiais passantes em cada uma delas.

Quadro 1 - Resultado do ensaio de peneiramento

Abertura da malha (mm)	Massa de material retido (g)	Massa de material acumulado (g)	Massa de material passante (g)	Material passante (%)
1,2	0,19	0,19	58,68	99,677
0,6	0,43	0,62	58,25	98,947
0,42	0,35	0,97	57,90	98,352
0,25	0,78	1,75	57,12	97,028
0,15	1,3	3,05	55,82	94,819
0,075	2,12	5,17	53,70	91,218

Fonte: Autoria própria (2023)

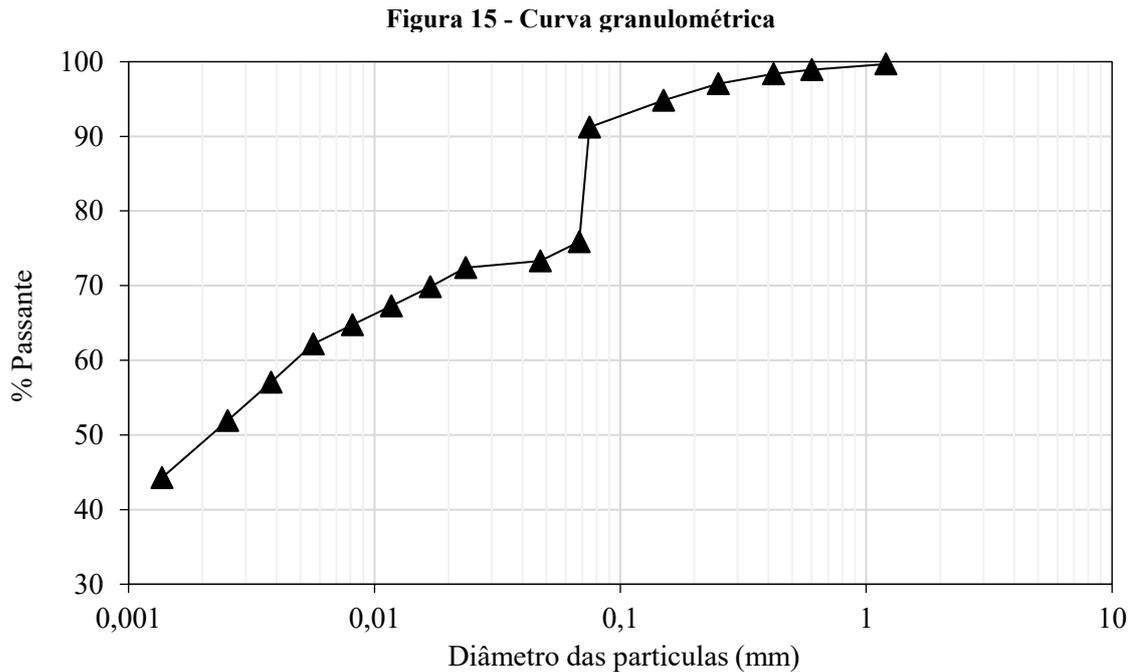
E, em sequência, o ensaio de sedimentação com os resultados descritos no Quadro 2. As siglas do quadro indicam: t – tempo, L – Leitura do densímetro, T – Temperatura, h – Altura de queda, ρ_w – Massa específica da água, Lc – Leitura corrigida, μ – Viscosidade do fluido, D – diâmetro dos grãos passantes e P – material passante.

Quadro 2 - Resultados do ensaio de sedimentação

t (min)	Leitura do densímetro (g/cm^3)	T ($^{\circ}\text{C}$)	h (cm)	ρ_w (g/cm^3)	Lc	μ ($\text{g} \times \text{s}/\text{cm}^2$)	D (mm)	P (%)
0,5	37	21,1	7,3505	0,9979	29,65	10,06	0,096	75,85
1	37	21,1	7,3505	0,9979	29,65	10,06	0,068	75,85
2	36	21,1	7,3515	0,9979	28,65	10,06	0,047	73,28
4	35	21,1	5,6925	0,9979	29,31	10,06	0,034	74,97
8	34	21,1	5,6935	0,9979	28,31	10,06	0,023	72,41
15	33	21,1	5,6945	0,9979	27,31	10,06	0,017	69,85
30	32	20,9	5,6955	0,998	26,30	10,11	0,012	67,29
60	31	20,9	5,6965	0,9980	25,30	10,11	0,008	64,73
120	30	21,0	5,6975	0,9980	24,30	10,09	0,006	62,17
240	28	21,4	5,6995	0,9979	22,30	9,99	0,004	57,05
480	26	22,4	5,7015	0,9977	20,30	9,76	0,003	51,92
1440	23	21,3	5,7045	0,9979	17,30	10,01	0,001	44,24

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 15 está é possível observar a curva granulométrica, na qual a porcentagem de material passante está representada no eixo das ordenadas, enquanto o diâmetro das partículas é representado no eixo das abscissas.



Fonte: Autoria própria (2023)

Quanto aos índices de consistência, não foram realizados os limites de liquidez e plasticidade devido a elevada variação dos resultados em função dos procedimentos experimentais. Dado a concordância entre os resultados de granulometria do presente trabalho com o estudo de Batelo (2019), optou-se por usar os resultados de LL e LP obtidos pela autora, a qual o utilizou o mesmo solo em condições de coleta e profundidade semelhantes.

A análise dos resultados possibilitou classificar o solo, com um limite de liquidez de 55% e um limite de plasticidade de 29%. Esse são valores determinados por meio de uma média simples, com um desvio padrão quase nulo, o que gera uma maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Com base nos limites mencionados, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo foi classificado como uma argila inorgânica de alta compressibilidade (CH), e à quanto a classificação da AASHTO, solo argiloso do tipo A-7-6.

5.2 Teste de pH e teor de cal

Após realizar o teste de pH e analisar os resultados presentes na Tabela 4, verificou-se que o valor obtido não alcançou o pH mínimo de 12,4, para nenhum teor de cal hidratada necessário para a estabilização do solo, conforme recomendado pela norma do DNIT 419 (2019).

Tabela 4 - Resultado do teste do pH

Identificação	Quant. Solo (g)	Quant. Solo seco(g)	Quant. de Cal (g)	Cal (%)	Quant. Água (ml)	pH	Temperatura (°C)
1	25	21,324	0,426	2	100	9,85	25,4
2	25		0,853	4	100	11,03	25,2
3	25		1,279	6	100	11,59	25,1
4	25		1,705	8	100	11,94	24,9
5	25		2,132	10	100	12,04	25,0
6	-		2	100	100	12,17	24,9
7	25		-	0	100	100	6,23

Fonte: Autoria própria (2023)

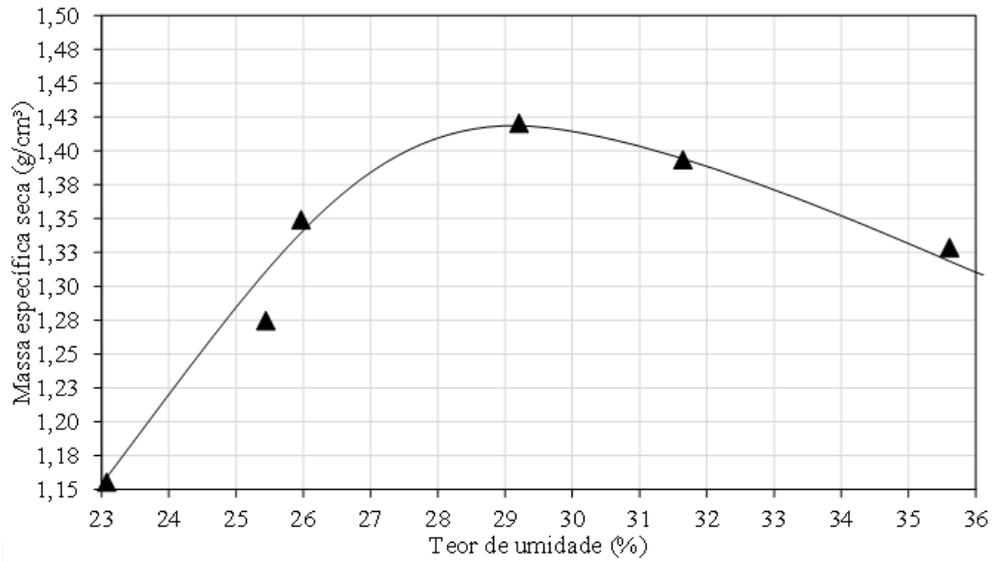
Vale ressaltar que o teor significativo de 22,7% de alumínio presente no solo, conforme observado na norma DNIT 419 (2019), para solos tropicais residuais ricos em óxi-hidróxidos de ferro, o valor de pH de 12,4 não será atingido, em decorrência do início precoce das reações químicas, em que o hidróxido de cálcio é consumido muito rapidamente pelas reações pozolânicas.

Com base nos resultados obtidos por Sartori (2015), que utilizou um solo semelhante, com uma variação de teor de cal entre 3% e 7%, se sabe que a mistura de solo com 5% de cal já apresenta uma resistência média satisfatória de 2,26 Mpa para bases de pavimentação. De acordo com o Manual do DNIT (2006) o teor de cal indicado para estabilização de solo-cal é entre 6% e 10%, de acordo com o resultado obtido no teste de pH foi utilizado neste trabalho 8% de cal para a mistura no solo.

5.3 Compactação

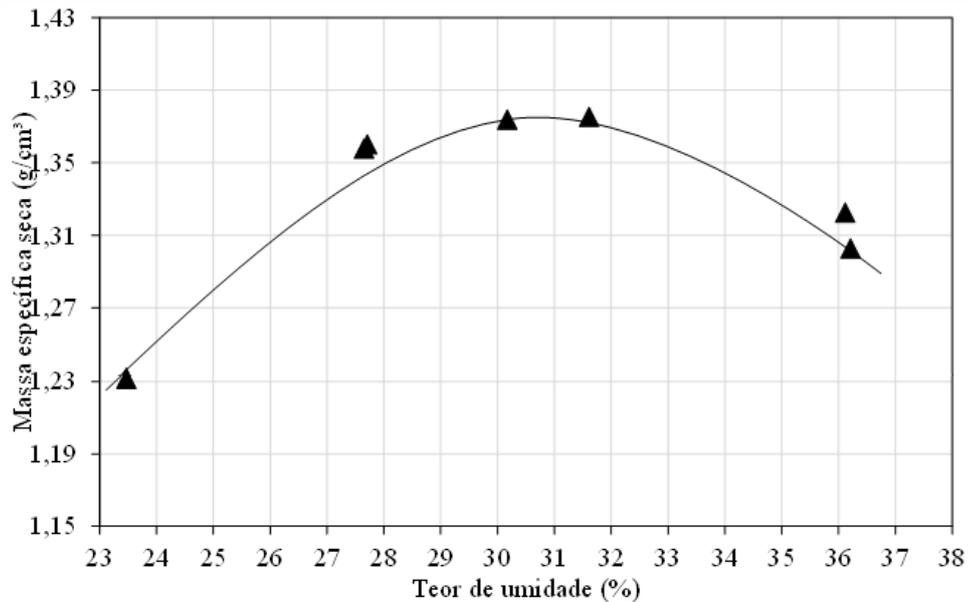
As curvas de compactação estão apresentadas nas Figura 16 e Figura 17 para o solo e a mistura solo-cal, em função da massa específica aparente seca e teores de umidade adotados.

Figura 16 - Curva de compactação do solo



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 17 - Curva de compactação da mistura solo-cal



Fonte: Autoria própria (2023)

No Quadro 3 é apresentado o teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima de cada uma das curvas acima.

Quadro 3 - Representação do teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima

Condição do ensaio	Massa específica seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)
Solo	1,42	28,8
Solo-cal	1,37	30,6

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos resultados dos ensaios, observou-se uma redução na massa específica seca máxima e um aumento no teor de umidade. Isso se deve à menor densidade da cal em comparação com a do solo. A necessidade de uma maior quantidade de água para interação da cal com as partículas do solo resulta em um teor de umidade mais elevado em comparação com o corpo de prova moldado exclusivamente com o solo.

5.4 Resistência à Compressão Simples

Essa subseção apresenta os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples do solo e da mistura solo-cal. Nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 são apresentados os valores de RCS obtidos com o rompimento dos corpos de prova com os tempos de cura 3, 7 e 28. As siglas da Tabela 5, Tabela 6 Tabela 7 indicam: I – corpo de prova imerso, N – corpo de prova não imerso, P1 – primeiro corpo de prova, P2 – segundo corpo de prova, Abs – Absorção de água do corpo de prova, Φ – Diâmetro do corpo de prova, h – altura do corpo de prova.

Tabela 5 - Corpos de prova rompidos com 3 dias

Material	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	Φ (mm)	h (cm)	Área (mm ²)	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1842	1901	59	99,7	12,7	7806,93	0,4	51,2	64,1
	I	1854	1911	57	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	
	N	1896	1896	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,9	
Solo-Cal	I	1814	1910	96	99,7	12,6	7806,93	1,1	140,9	147,5
	I	1874	1936	62	99,6	12,7	7791,28	1,2	154,0	
	N	1872	1872	-	99,5	12,7	7775,64	1,2	154,3	

Fonte: Autoria própria (2023)

Foi possível observar que a resistência com o tempo de cura de 3 dias, imerso em água e não imerso em água apresentaram uma variação significativa, bem como a mistura solo-cal apresentou uma resistência duas vezes maior do que o solo, demonstrando a eficiência do método de estabilização para esse tipo de solo.

Em relação aos corpos de prova rompidos com 7 dias (Tabela 6), pode-se observar que os valores de resistência da mistura solo-cal não sofreram muita alteração em relação aos de 3 dias, indicando que as reações ocorreram de maneira rápida durante o período de cura inicial.

Tabela 6 - Corpos de prova rompidos com 7 dias

Material	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	Φ (mm)	h (cm)	Área (mm ²)	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1842	1901	59	99,7	12,7	7806,93	0,4	51,2	64,1
	I	1854	1911	57	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	
	N	1896	1896	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,9	
Solo-Cal	I	1834	1866	32	99,5	12,7	7775,64	1,0	128,6	147,7
	I	1849	1880	31	99,6	12,6	7791,28	1,3	166,9	
	N	1843	1843	-	99,7	12,7	7806,93	1,3	166,5	

Fonte: Autoria própria (2023)

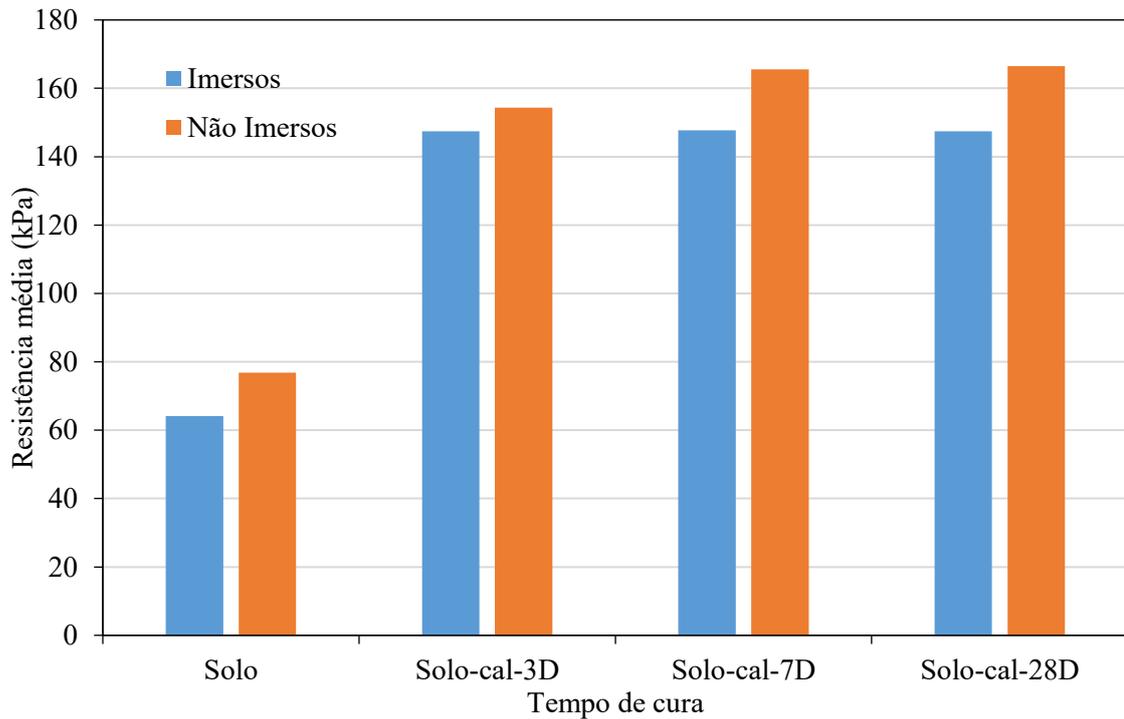
Logo após os 28 dias (Tabela 7), a resistência permaneceu quase a mesma, sendo assim na mistura solo-cal são necessários, no mínimo, 3 dias para o processo químico ocorrer, com apenas 8% de cal na mistura, para que aconteça a estabilização do solo e apresentar uma melhor resistência. A resistência do corpo de prova somente com o solo não teve variação, pois não teve nenhuma mistura adicionado ao mesmo.

Tabela 7 - Corpos de prova rompidos com 28 dias

Material	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	Φ (mm)	h (cm)	Área (mm ²)	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1842	1901	59	99,7	12,7	7806,93	0,4	51,2	64,1
	I	1854	1911	57	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	
	N	1896	1896	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,9	
Solo-Cal	I	1854	1901	47	99,7	12,7	7806,93	1,1	140,9	147,5
	I	1844	1888	44	99,6	12,8	7791,28	1,2	154,0	
	N	1814	1814	-	99,7	12,7	7806,93	1,3	166,5	

Fonte: Autoria própria (2023)

Com o intuito de avaliar os tempos de cura (3, 7 e 28 dias) e a porcentagem de 8% de cal hidratada CH-III, elaborou-se a Figura 18.

Figura 18 - RCS em função do tempo de cura.

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão simples, fica evidente uma pequena variação na resistência do solo, atribuída à ausência de componentes químicos e a variação inerente a um ensaio experimental. Já ao analisar a mistura solo-cal, observou-se uma leve variação na resistência em relação ao tempo de cura, tanto o corpo de prova imerso como não imerso em água, indicando que tempos de cura superior a 3 dias não desempenham um papel preponderante no comportamento da mistura.

6 CONCLUSÕES

Ao avaliar o comportamento do solo argiloso com a adição de cal hidratada CH-III, com os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias, com o teor de cal de 8%, observou-se que:

- por conta da quantidade de 53,9% de ferro e 22,7% de alumínio presentes no solo, o método do pH não foi eficiente para determinar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo;
- a análise dos parâmetros de compactação revelou que a utilização de 8% de cal resultou na redução da massa específica aparente seca máxima e no aumento do teor de umidade ótimo. Isso se deve à menor densidade da cal em comparação com a do solo, além de sua textura mais fina, o que resulta em uma maior absorção de água para lubrificar as partículas;
- Foi observado aumento significativo, entre duas e três vezes, na resistência à compressão simples do solo quando inserido cal. Além disso, os tempos de cura não se mostraram uma variável tão significativa, uma vez que após 3 dias, a resistência atingiu seu valor máximo e permaneceu aproximadamente constante nos períodos subsequentes.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3282-93**. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregates Mixtures for Highway Construction Purposes, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024**: solo: cimento: moldagem e cura de corpo de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: solo: cimento: ensaio de compressão simples de corpo de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: amostra de solo: preparação para o ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- BATELO, L. C. E. **Estudo das características físicas de um solo de Campo Mourão por meio de ensaios de laboratório**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório gerencial**, Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018.

CRISPIM, F. A. **Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2017.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT/Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisa Rodoviária **Norma DNIT 419/2019 - ME**. Pavimentação - Solo-cal - Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo - Método de ensaio. Brasília, Out. 2019.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - **ES 143/2010**. Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço. Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, Nov. 2010.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization.

FERREIRA, J. W. S. **Comportamento mecânico de misturas solos-cimento para aplicação em pavimentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 81”**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2003.

GONÇALVES, F. *et al.* Caracterização físico-química e mineralógica de três solos do estado do Paraná. In: **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Anais...COBRAMSEG, Salvador, 2018.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

Highway Research Record, Washington, DC, v. 139, p. 61–72, 1966.

KLEINERT, T. R. **Estabilização de solos tropicais com cal e impactos no dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

MARINO, D. M. **Estudo de dois perfis de solo tropical com adição de cal**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

MARQUES, G. L. O. Pavimentação. Notas de aula. Universidade Federal de **Juiz de Fora**, Juiz de fora, 2012.

NEVES, E. N. S. A. C. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal: modelos de comportamento.** 2009. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2009.

RODRIGUES, K. H. P. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração.** 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2018.

ROSA, A. D. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinca-cal.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SILVA, M. F. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.