

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO LUIZ RISSARDI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE UM SOLO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

JOÃO LUIZ RISSARDI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE UM SOLO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado ao curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO DE UM SOLO DA
FORMAÇÃO GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL**

Por

JOÃO LUIZ RISSARDI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 07 de dezembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Orientadora – Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

Rodrigo César Pierozan, Me.
UFPR

Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.
UTFPR

Ronaldo Luis dos Santos Izzo, Dr.
UTFPR

*Dedico este trabalho aos meus pais
João Batista & Ana Maria*

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Dra. Amanda Dalla Rosa Johann, minha imensa gratidão pela atenção, disponibilidade e ensinamentos compartilhados durante este e outros trabalhos.

Ao Me. Rodrigo Pierozan, Dr. Rogério Puppi e Dr. Ronaldo Izzo pelas sugestões e contribuições que enriqueceram esta pesquisa.

Aos meus pais que, com muito apoio, não mediram esforços para que eu pudesse chegar até esta etapa de minha vida.

Ao Eng. Vitor Bordignon que com seus estudos nortearam a realização desta pesquisa.

À todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta etapa de minha vida valer cada vez mais a pena.

*"Na natureza nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma".*

Antoine Lavoisier

RESUMO

RISSARDI, João Luiz. **Análise da Resistência à Tração de um Solo da Formação Guabirotuba Estabilizado com Cal**. 2016. 88 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Ao longo do desenvolvimento dos processos construtivos, o solo é cada vez mais aplicado na construção civil como base de grandes estruturas, pontes, túneis, estradas, aeroportos, hidroelétricas, fundações, entre outras. Algumas vezes o solo local apresenta propriedades insatisfatórias, que por ser um material complexo e muito variável, torna-se inviável o seu uso na engenharia. Visando solucionar este impasse, a engenharia geotécnica atual desenvolve com sucesso tecnologias para a estabilização artificial de solos através de técnicas de adição de substâncias que melhoram as propriedades do mesmo. A presente pesquisa selecionou certa quantidade de um solo oriundo da Formação Guabirotuba para estabilização artificial do mesmo com cal hidratada em pó do tipo CH-III. Para esta análise foram moldados corpos de prova para diferentes teores de cal (0%, 3%, 6%, 8% e 16% de cal em relação ao peso do solo natural) e diferentes tempos de cura (7, 14, 28 e 56 dias), os quais foram submetidos ao ensaio de resistência à tração (q_t). Ainda nesta pesquisa foram abordados outros parâmetros importantes na determinação do comportamento geotécnico deste solo, como composição granulométrica, umidade ótima (ω), peso específico aparente seco máximo (γ_d) e massa específica real dos grãos (G_s). A amostra de solo empregado nesta pesquisa apresentou predominantemente areia em sua composição, além de G_s de aproximadamente $2,263 \text{ g/cm}^3$, γ_d de $1,575 \text{ g/cm}^3$ e ω de 26,75%. Todas as misturas solo-cal apresentaram ganhos significativos de q_t em relação ao solo natural compactado, sendo este aumento de até 20 vezes para os corpos de prova com teor de 16% de cal curados em 56 dias. As misturas de solo-cal estudadas apresentaram uma relação de q_t por resistência à compressão simples (q_u) em todo de 0,192.

Palavras-chave: Solo-Cal. Resistência à Tração. Formação Guabirotuba.

ABSTRACT

RISSARDI, João Luiz. **Tensile Strength Analysis of a Soil from Guabirotuba Formation Stabilized with Lime.** 2016. 88 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Throughout the development of the construction process, soil is increasingly applied in construction as the basis for large structures, such as bridges, tunnels, roads, airports, power plants, foundations, among others. Sometimes the local soil has unsatisfactory properties, because it is a complex and variable material, it becomes unfeasible its use in engineering. Aiming to solve this issue, the current geotechnical engineering successfully develops technologies for artificial soil stabilization through techniques of adding substances that improve soil properties. This search has selected certain amounts of a soil coming from the Guabirotuba Formation for artificial stabilization with CH-III hydrated lime powder. For this analysis, some samples were molded with different lime contents (0%, 3%, 6%, 8% and 16% lime with respect to the weight of natural soil) and different curing times (7, 14, 28 and 56 days), which were submitted to the tensile strength test (q_t). Also, this study approached other important parameters in determining of geotechnical behavior of this soil, such as particle size composition, optimum moisture (ω), apparent maximum dry unit weight (γ_d), and real density of grains (G_s). The soil sample used in this research presented predominantly sand in its composition, G_s of approximately $2,263 \text{ g/cm}^3$, γ_d of $1,575 \text{ g/cm}^3$ and ω 26,75%. All soil-lime samples showed significant q_t gains in relation to the compressed natural soil, with an increase up to 20 times for the samples with 16% content of lime cured in 56 days. The studied soil-lime mixtures showed a relation of q_t per simple compression strength (q_u) around 0,192.

Key-words: Soil-Lime. Tensile Strength. Guabirotuba Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais Tipos de Solo 1	19
Figura 2 - Perfil e Horizontes de um Solo.....	22
Figura 3 - Localização da Formação Guabirota	23
Figura 4 - Solo Coletado e Armazenado	35
Figura 5 - Armazenamento da Cal	35
Figura 6 - Amostra do Solo Preparada para os Ensaios	37
Figura 7 - Estufa e Cápsulas para o Ensaio da Determinação da Umidade Higroscópica	38
Figura 8 - Ensaio de Determinação da Massa Específica Real dos Grãos.....	38
Figura 9 - Amostra Destorroadada do Solo.....	39
Figura 10- Ensaio de Peneiramento e Sedimentação	40
Figura 11 - Equipamento para o Ensaio de Determinação do LL.....	41
Figura 12 - Equipamento para o Ensaio de Determinação da LP	41
Figura 13 - Limites de Consistência do Solo.....	42
Figura 14 - Equipamento para o Ensaio de Compactação	43
Figura 15 - Medição do pH das Misturas Solo-cal.....	44
Figura 16 - Ensaio de Resistência à Tração	45
Figura 17 - Molde Adaptado.....	48
Figura 18 - Relação da Altura de Queda com a Leitura do Densímetro.....	53
Figura 19 - Curva Granulométrica do Solo Natural	53
Figura 20 - LL do Solo Natural.....	55
Figura 21 - LL do Solo com 3% de Cal	56
Figura 22 - LL do Solo com 6% de Cal	57
Figura 23 - LL do Solo com 8% de Cal	58
Figura 24 - LL do Solo com 16% de Cal.....	59
Figura 25 - Influência da Cal no LP das Misturas Solo-Cal.....	61
Figura 26 - Curva de Compactação do Solo Natural	64
Figura 27 - pH por mistura solo-cal	66
Figura 28 - Qt ao Longo do Tempo de Cura	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Peso Específico da Água em Função da Temperatura (gf/cm³)50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais Classificações Granulométricas dos Solos.....	25
Tabela 2 - Exigências Químicas e Físicas da Cal Hidratada (NBR 7175)	30
Tabela 3- Exigências Físicas da Cal Hidratada (NBR 7175).....	30
Tabela 4 - Quantidade de Corpos de Prova por Teor de Cal e Tempo de Cura.....	46
Tabela 5 - Umidade Ótima e Peso Específico Aparente Seco	46
Tabela 6 - Dosagem das Misturas Solo-Cal.....	47
Tabela 7 - Resultados da Determinação da Umidade Higroscópica do Solo Natural	49
Tabela 8 - Dados do Ensaio de Massa Específica Real dos Grãos	50
Tabela 9 - Dados da Determinação da Granulometria por Peneiramento	51
Tabela 10 - Dados da Determinação da Granulometria por Sedimentação.....	52
Tabela 11 - Dados da Calibração do Densímetro	52
Tabela 12 - Composição Granulométrica do Solo Natural.....	54
Tabela 13 - Dados da Determinação do LL do Solo Natural.....	54
Tabela 14 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 3% de Cal	55
Tabela 15 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 6% de Cal	56
Tabela 16 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 8% de Cal	57
Tabela 17 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 16% de Cal	58
Tabela 18 - Dados da Determinação do LP do Solo Natural.....	59
Tabela 19 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 3% de Cal.....	60
Tabela 20 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 6% de Cal.....	60
Tabela 21 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 8% de Cal.....	60
Tabela 22 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 16% de Cal	60
Tabela 23 - Resumo dos Ensaio de LL e LP, e Determinação do IP	62
Tabela 24 - Dados Ensaio de Proctor do CP1.....	63
Tabela 25 - Dados Ensaio de Proctor do CP2.....	63
Tabela 26 - Dados Ensaio de Proctor do CP3.....	63
Tabela 27 - Dados Ensaio de Proctor do CP4.....	63
Tabela 28 - Dados Ensaio de Proctor do CP5.....	64
Tabela 29 - Dados da Determinação do Peso Específico	64
Tabela 30 - pH dos Materiais	65
Tabela 31 - Resultado de qt dos Corpos de Prova (MPa)	66
Tabela 32 - Relação de qt das Misturas Solo-Cal em Relação ao Solo natural.....	67
Tabela 33 - Resultados de Qu das Misturas Solo-Cal (MPa).....	69
Tabela 34 - Relação qt/qu	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 ASPECTOS GERAIS	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 SOLOS	18
2.2 TIPOS DE SOLOS.....	19
2.2.1 Solos Residuais	20
2.2.2 Solos Transportados.....	20
2.3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO E HORIZONTES DE SOLO.....	21
2.4 FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....	22
2.5 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS	24
2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	25
2.7 TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	25
2.7.1 Estabilização Mecânica.....	26
2.7.2 Estabilização Química.....	26
2.8 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL.....	27
2.8.1 Cal.....	28
2.8.1.1 Cal Virgem.....	28
2.8.1.2 Cal Hidratada.....	29
2.9 REAÇÕES SOLO-CAL.....	31
2.10 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL.....	31
3 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS.....	34
3.1 MATERIAIS	34
3.1.1 Solo	34
3.1.2 Cal.....	35
3.1.3 Água	36
3.2 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS	36
3.2.1 Preparação da Amostra de Solo.....	36
3.2.2 Deteminação da Umidade Higroscópica	37
3.2.3 Ensaio de Deteminação da Massa Específica Real dos Grãos	38
3.2.4 Análise Granulométrica	39
3.2.5 Limites Físicos de Consistência.....	40
3.2.6 Ensaio de Compactação.....	42
3.2.7 Ensaio de pH.....	43
3.2.8 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	44
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS SOLO-CAL.....	45
3.3.1 Dosagem das Misturas Solo-cal	46
3.3.2 Moldagem e Tempo de Cura dos Corpos de Prova.....	47

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	49
4.2 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS.....	50
4.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	51
4.3.1 Análise Granulométrica por Peneiramento	51
4.3.2 Análise Granulométrica por Sedimentação.....	51
4.3.3 Curva Granulométrica.....	53
4.4 LIMITES FÍSICOS DE CONSISTÊNCIA.....	54
4.4.1 Limite de Liquidez	54
4.4.2 Limite de Plasticidade.....	59
4.4.3 Índice de Plasticidade.....	62
4.5 COMPACTAÇÃO.....	62
4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	65
4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	66
4.8 RELAÇÃO QT/QU	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1 CONCLUSÕES	70
5.2 SUGESTÕES.....	72
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	78

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é relatada uma breve introdução sobre o tema estudado, apresentando a importância da utilização da cal hidratada em pó na melhoria de solos da região metropolitana do município de Curitiba/PR. Ainda neste capítulo são abordados os objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa para a realização deste trabalho.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Desde os primórdios, o solo é utilizado como matéria prima na construção civil, na maioria dos casos como base de estruturas de pontes, túneis, estradas, aeroportos, hidroelétricas, fundações, entre outras. Algumas vezes o solo local apresenta propriedades insatisfatórias que, por ser um material complexo e muito variável, tornando o uso do mesmo inviável na engenharia. A utilização de bases granulares para pavimentação, por exemplo, torna-se inviável quando a jazida está muito distante do local da obra, pelos elevados custos associados ao transporte e danos ambientais provenientes da própria exploração e transporte do material (JOHANN, 2013).

Com o atual contexto de desenvolvimento sustentável e econômico, tem-se buscado a utilização de materiais localizados na obra ou nas imediações, sejam em qualquer tipo de obra de terra como: aterros, estradas, terraplanagens, etc. Visando solucionar este impasse, a engenharia geotécnica vem desenvolvendo com sucesso técnicas e tecnologias para a estabilização artificial de solos utilizando cal ou cimento (BUENO, 2011).

O termo “estabilização do solo” corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente às deformações e ao deslocamento em relação ao solo original. Tais processos consistem em modificar as características do sistema solo-água-ar com a

finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (HOUBEN; GUILLAUD, 1994).

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura compactada de solo (geralmente argila), cal e água, em proporções estabelecidas através de uma dosagem (USDI, 1998).

A pesquisa apresentada neste trabalho analisou o desempenho mecânico de um solo oriundo da Formação Guabirota estabilizado artificialmente com cal hidratada em pó, por meio de ensaios de tração por compressão diametral. Para tanto, vários procedimentos experimentais foram realizados, possibilitando a análise detalhada de pontos importantes em misturas solo-cal, como o peso específico aparente seco, a umidade, o tempo de cura e o teor de cal.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho possui objetivos gerais e específicos apresentados a seguir:

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a resistência à tração por compressão diametral de um solo oriundo da formação Guabirota estabilizado com cal hidratada, através da moldagem de amostras, com diferentes teores de cal, ensaiadas em diferentes tempos de cura.

1.2.2 Objetivos Específicos

Assim, para verificar o objetivo geral do presente trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e classificar a amostra do solo em laboratório;
- Avaliar a influência do teor de cal na resistência à tração diametral da mistura solo-cal estudada;
- Avaliar a influência do tempo de cura na resistência à tração diametral da mistura solo-cal estudada, e;
- Estabelecer relações entre a resistência à tração por compressão diametral (estudada nesta pesquisa, q_t) com a resistência à compressão simples (estudada por Bordignon (2015), q_u) da mistura solo-cal em questão.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui solos com uma vasta diversidade de tipos, formas, cores, granulometrias, composição química, composição mineralógica, dentre outras propriedades/características. Devido a isso, várias regiões do país possuem solos do tipo argiloso, os quais muitas vezes não possuem propriedades adequadas a sua utilização na construção civil. O solo predominante do município de Curitiba/PR, por exemplo, oriundo da Formação Guabirotuba pode ser classificado como argila siltosa ou silte argiloso, com presença de materiais granulares, segundo Komann (2002).

Dependendo da região em que a obra será executada, torna-se necessário realizar a remoção total ou parcial do material existente, sendo este substituído por outro material para fornecer a resistência mais adequada, conforme exigências descritas em projeto. Desta forma, existe como alternativa para a solução deste problema, a utilização da mistura do solo existente no local da obra com a cal hidratada em pó, evitando assim o descarte do mesmo. Esta técnica consagrada é conhecida como solo-cal e já teve sua eficiência comprovada no solo da Formação Guabirotuba, através de estudos realizados por Guérios (2013) e Bordignon (2015).

O conhecimento das potencialidades de determinados materiais da região onde ocorre a obra, ou mesmo as limitações destes materiais na natureza podem ajudar a solucionar este problema, fornecendo assim a possibilidade de escolha de soluções mais viáveis economicamente e ambientalmente para cada caso específico. No caso do município de Curitiba/PR, por exemplo, além do uso de solo-cal como uma solução de problemas técnicos de engenharia, o solo-cal proporciona também um incremento socioeconômico na região, pois na mesma estão localizadas diversas indústrias produtoras de cal.

A resistência à tração de solos tem sido determinada através de métodos que utilizam a aplicação de outros esforços que não os de tração direta e correlacionam os resultados obtendo indiretamente o valor desejado. Em ensaios de determinação direta da tração há problemas relacionados à forma de prender as amostras nas extremidades para que possam ser tracionadas. Isto provoca a concentração de tensões no corpo de prova (JOHANN, 2013).

Neste trabalho é utilizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, que consiste no carregamento de amostras cilíndricas no sentido de seu diâmetro. Com este ensaio associado ao ensaio de resistência à compressão simples é possível obter uma relação. Uma vez que essa relação é conhecida, torna-se viável realizar apenas um dos testes de resistência e estimar-se o valor da outra resistência, evitando-se assim o desperdício de material, tempo e dinheiro. Além deste ensaio ser de fácil execução, é um ensaio amplamente utilizado no meio científico (JOHANN; *et al.*, 2016; CONSOLI; *et al.*, 2012).

Devido ao fato da aplicação da carga de compressão ser tecnicamente mais fácil do que a aplicação da carga de tração, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi considerado como “ensaio ideal” para a avaliação das propriedades de tração em materiais frágeis, evitando erros de execução que influenciem de maneira significativa nos resultados finais. Este ensaio se justifica adequado para determinação do comportamento mecânico em casos como das camadas de pavimentações que encontram-se expostas diretamente à ação de tráfego, sendo submetidas constantemente a ciclos de carga e descarga. Este processo da aplicação de carga e descarga faz que surjam fissuras e deformações, sendo as primeiras relacionadas ao esforço da tração indireta das camadas (GUEDES; COUTINHO; FONSECA, 2016).

O presente trabalho, ao estudar algumas das variáveis importantes no controle da resistência à tração diametral de solos artificialmente tratados com cal hidratada em pó, fornece subsídios para que, a partir da manipulação adequada de tais variáveis por meio de dosagem, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas nestas misturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão descritos os conceitos que possuem fundamental importância na compreensão deste trabalho.

2.1 SOLOS

O termo solo origina-se do latim, "*solum*", o qual significa suporte, superfície, base. O solo é um sistema particulado composto de partículas tridimensionais sólidas e espaços vazios, os quais podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água (TERZAGHI; PECK, 1962).

O solo é definido como uma coleção de materiais naturais, constituídos, em sua grande maioria, por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicas, tendo sua formação composta por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte da camada superficial das extensões continentais do nosso planeta, possuem também matéria viva e podem ser constituídos de vegetais existentes na natureza, podendo, eventualmente, ter sido modificado por interferências do homem, fauna e/ou flora (EMBRAPA, 2006).

A NBR 6502 define o solo como sendo um material originário da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. Sua decomposição é decorrente da ação das intempéries (agentes físicos e químicos). Suas variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais. O congelamento da água nas trincas, entre outros fatores, exercem elevadas tensões, do que decorre maior fragmentação dos blocos. A norma ainda relata que os solos podem ser formados pela presença da fauna e flora que promovem o ataque químico, através de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros (ABNT, 1995).

Para Vargas (1978), a formação do solo depende de pelo menos cinco fatores: a natureza da rocha mãe, o clima da região, o agente de intemperismo de transporte, a topografia da região e os processos orgânicos. Além disso, os

processos de formação dos solos podem atuar sucessivamente sobre um mesmo solo.

2.2 TIPOS DE SOLOS

Na superfície terrestre pode-se encontrar diversos tipos de solos, cada tipo possui características próprias, tais como densidade, formato, cor, consistência e formação química, entre outras características/propriedades. O agrupamento dos diversos tipos de solos em conjuntos distintos ocorreu devido à grande diferença de comportamento apresentada pelos solos diante das informações de interesse. O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou pelo menos, o de orientar um programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (PINTO; PREUSSLER, 2002).

De acordo com Vaz (1996), os solos, de um modo geral, podem ser divididos em dois principais grupos: solos residuais e solos transportados. Na Figura 1 estão apresentados os principais tipos de solos.

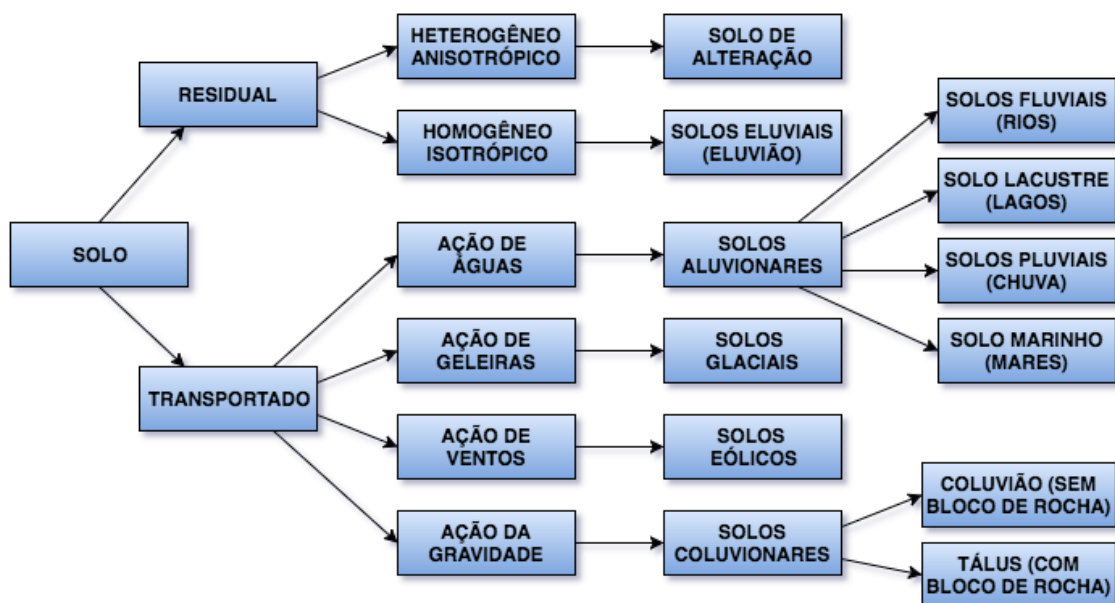


Figura 1 - Principais Tipos de Solo 1
Fonte: Adaptado de Vaz (1996).

2.2.1 Solos Residuais

Solos residuais são aqueles em que os resíduos do intemperismo das rochas permanecem no local e na posição da rocha que lhes deu origem, constituindo assim o manto do intemperismo. As profundidades dos solos residuais dependem principalmente das condições climáticas e tempo de exposição (TERZAGUI; PECK, 1962).

De acordo com Vaz (1996), um solo residual podem ser homogêneo (isotrópico) ou heterogêneo (anisotrópico). O solo residual heterogêneo, ou solo de alteração, são facilmente identificados pela heterogeneidade e anisotropia impostas pelas estruturas da rocha de origem. O solo residual homogêneo, ou solos eluviais, são caracterizados pela sua cor homogênea e sua isotropia, consequência da ausência total das estruturas da rocha mãe. Além disso, os solos eluviais só ocorrem acima dos solos de alteração, pelos quais passam gradualmente.

2.2.2 Solos Transportados

De acordo com Oliveira e Brito (1998), os solos transportados são também conhecidos como solos sedimentares, pois são solos sedimentados por um agente transportador. Os solos transportados são solos que foram levados de seu local de origem por algum agente de transporte e lá depositados, formam geralmente depósitos mais inconsolidados e fofos que outros solos, e com profundidade variável. Dependendo do agente responsável pelo transporte dos materiais resultantes do intemperismo, os solos transportados podem ser divididos em quatro tipos: aluviais, coluviais, eólicos e glaciais.

Solos aluviais são solos transportados pelas águas e depositados quando a corrente sofre uma diminuição da sua velocidade, ou quando o transporte é feito por grandes volumes de água. O agente transportador dos solos coluviais é a gravidade, que faz cair massas de solo e rochas ao longo dos taludes. Já os solos eólicos são

aqueles transportados pelo vento, normalmente encontrados nas regiões litorâneas ou em desertos (VARGAS, 1978).

2.3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO E HORIZONTES DE SOLO

Compreende-se como perfil um corte vertical feito no solo, desde a sua superfície até o material original ou rocha matriz que lhe deu origem, com o fim de estudá-lo para então classificá-lo. Um perfil de solo apresenta diferenciações de cor, textura e composição química. Por meio das ações do intemperismo atuam os processos de formação do solo, que vão os diferenciando em camadas características, formando os horizontes (OLIVEIRA, 2005).

Os horizontes são porções do solo, aproximadamente paralelas à superfície, que sofreram a atuação dos processos de formação do solo, de modo que se distinguem em camadas. Os horizontes do solo são, de um modo geral, denominados de O, A, B e C. O horizonte O pode ser definida como uma camada orgânica superficial, drenada, cor escura. O horizonte A é a camada superficial enriquecida com material orgânico, o horizonte B é a zona de iluviação, ou seja, onde ocorre deposição dos materiais oriundos do horizonte que se encontra acima, e o horizonte C é constituído por material de origem pouco afetado pelos mecanismos de gênese do solo (EMBRAPA, 1983; OLIVEIRA, 2005).

Na Figura 2 estão apresentados o perfil e os horizontes de um solo.



Figura 2 - Perfil e Horizontes de um Solo
Fonte: CARVALHAIS

2.4 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

O termo "Formação" refere-se a uma unidade geológica de rocha que, geneticamente, representa um intervalo de tempo, curto ou longo, e pode ser composta de materiais provenientes de diversas fontes. O nome de uma formação é dado em função da localidade em que foi descrita pela primeira vez, portanto o nome Formação Guabirota é devido aos sedimentos depositados em um abatimento de rocha gerado por falhas na forma de uma bacia, onde foram observados primeiramente, no bairro denominado Guabirota, localizado no município de Curitiba/PR. A Formação Guabirota abrange o município de Curitiba como um todo, além de cobrir parcialmente mais seis municípios que fazem divisa (FELIPE, 2011).

Na Figura 3 está apresentada a localização e distribuição da Formação Guabirota.

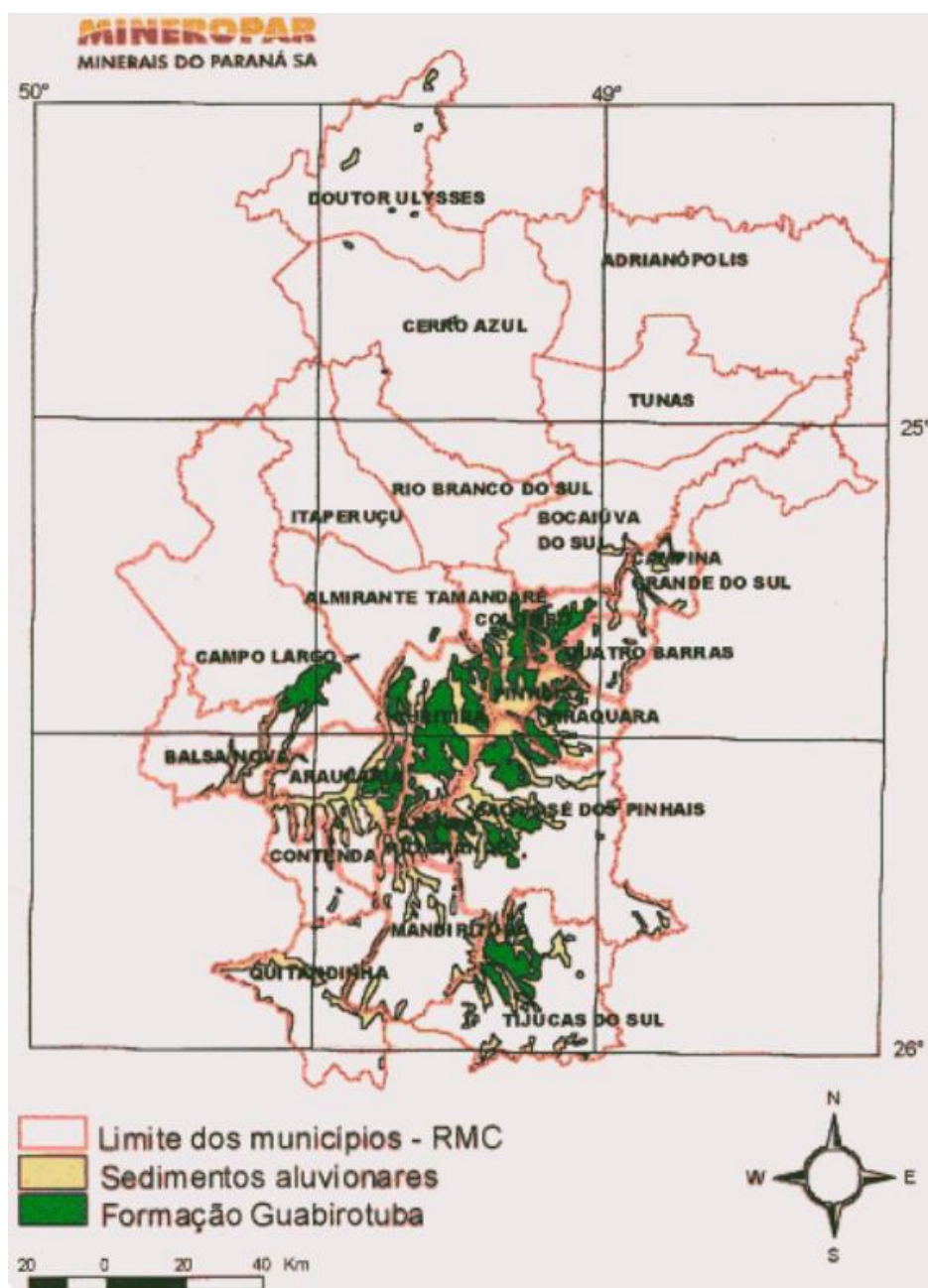


Figura 3 - Localização da Formação Guabirotuba
Fonte: Felipe (2011).

Felipe (2011) afirma em seu estudo que grande parte dos sedimentos que constituem a Formação Guabirotuba foi originada a partir da decomposição química de rochas Pré-Cambrianas. Os sedimentos desta formação atingem espessuras na ordem de 60 a 80 metros e compreendem sequências litológicas nas quais predominam as argilas e areias arcólicas. Segundo o autor, a composição basal da Formação é constituída, por vezes, por cascalhos e arcólios de granulometria

grosseira. Este conjunto de sedimentos está depositado sobre as rochas do Complexo Atuba, e pode apresentar concentração de carbonato de cálcio impregnando os sedimentos.

Segundo Kormann (2002), os solos argilosos da Formação Guabirotuba geralmente possuem como característica marcante uma consistência elevada (rija a dura). O autor relata que é comum encontrar valores entre 15 a 30 golpes em sondagens de SPT logo nos primeiros metros de análise.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar um programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do material existente no local (BORDIGNON, 2015).

Os solos possuem várias classificações, eles podem ser classificados de acordo com a sua origem, formação, composição de minerais, composição química, dimensões, entre outras características e/ou propriedades. Na engenharia a classificação básica dos solos é feita em termos da dimensão de suas partículas. O solo pode conter grãos de argila, silte, areia, pedregulhos e pedras. Para determinar a percentagem de cada fração presente no solo é feita a análise granulométrica (DAS, 2007).

As principais classificações granulométricas dos solos utilizadas mundialmente são: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AASHTO (*American Association for State Highway and Transportation Officials*), ASTM (*American Society for Testing Materials*) e CEN (*Comité Européen de Normalisation*). No Brasil se utiliza os parâmetros da NBR 6502 (BORDIGNON, 2015). Na Tabela 1 estão demonstrados de maneira sucinta as classificações descritas acima.

Tabela 1 - Principais Classificações Granulométricas dos Solos

Partícula	ABNT (mm)	AASHTO (mm)	ASTM (mm)	CEN (mm)
Pedregulho	2 – 6	2 – 60	4,75 – 60	2 – 20
Areia	0,06 – 2	0,075 – 2	0,075 – 4,75	0,02 – 2
Silte	0,002 – 0,06	0,005 – 0,075	0,005 – 0,075	0,002 – 0,02
Argila	< 0,002	0,001 – 0,005	0,001 – 0,005	< 0,002

Obs.: ABNT NBR 6502 (1995); ASTM D2486 (1983); AASHTO M145 (1973); CEN (1990).

Fonte: Bordignon (2015).

2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

De acordo com Pinto (2008), estabilização de solos são todos os processos naturais e/ou artificiais que venham a melhorar as características como resistência e durabilidade, e que possam garantir a manutenção destas melhorias durante o seu estado ou processo de vida útil.

Para Vargas (1978), estabilização de solos é o processo pelo qual é conferido ao solo uma maior resistência a cargas ou à erosão, por meio de compactação, da correção granulométrica e da sua plasticidade ou da adição de substâncias que possam permitir uma coesão proveniente da cimentação ou mesmo da aglutinação de suas partículas.

Cordeiro (2007) relata que a estabilização de um solo envolve as propriedades de resistência mecânica do mesmo, e da suplementação necessária desta resistência para um determinado uso, em termos físicos, químicos e mecânicos. A escolha de um método consiste normalmente nas considerações de ordem econômica com relação ao custo de cada material.

2.7 TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Estabilizar um solo pode ser entendido como alterar suas propriedades a fim de melhorar seu desempenho para seu uso na engenharia. O resultado final é um material estável, onde mesmo exposto a cargas externas e situações de mudanças

de clima, é capaz de resistir. A estabilização mecânica e estabilização química são as estabilizações mais adotadas pela engenharia geotécnica (VIZCARRA, 2010).

2.7.1 Estabilização Mecânica

Soliz (2007) relata que a estabilização mecânica de um solo é o uso de uma simples compactação até um rearranjo das partículas deste material, ou seja, estabilizando granulometricamente o material em camadas. A estabilização mecânica deve conferir ao solo as características requeridas de atrito interno, de modo que não ocorram deformações excessivas ou ruptura por cisalhamento no material compactado.

De acordo com Santos, Lima e Bueno (1995), a correção granulométrica usando a estabilização mecânica traz melhoria ao solo através da adição de um ou mais solos com a finalidade de obter um novo material com propriedades aceitáveis para uso na engenharia. Os autores descrevem que a estabilização mecânica faz uso do processo de compactação do solo, no qual há uma redução do volume de vazios, que possui uma relação direta com o ganho de resistência do material compactado.

Para Pinto e Preussler (2002), esta estabilização pode ser obtida através do uso de alguns tipos de equipamentos mecânicos como: rolos compactadores, moto niveladoras, caminhões e compactadores manuais.

2.7.2 Estabilização Química

Oliveira (2000), define a estabilização química como sendo a adição de substâncias que melhoram as propriedades do solo, empregando-se geralmente a cal ou o cimento. Ainda de acordo com o autor, esta é uma técnica muito usada devido a sua facilidade de aplicação, versatilidade e principalmente pelos resultados

apresentados em campo, como o aumento na resistência à compressão simples, ao cisalhamento e à impermeabilidade.

Para Marques (2009), em uma estabilização química de solo, os ligantes mais utilizados são o cimento portland, a cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, cinzas volantes, dentre outros. O autor afirma que em solos argilosos (coesivos), encontram-se estruturas floculadas e dispersas que são mais sensíveis à presença de água, influenciando na resistência ao cisalhamento. Ainda segundo o autor, é comum a adição de agentes químicos que provoquem a dispersão ou floculação das partículas, ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes, seguida de uma adição de cimento.

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos (USDI, 1998).

2.8 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

A estabilização com a cal pode ser alcançada com o uso de cal hidratada ou cal virgem. O efeito da estabilização vai depender do ataque químico da cal sobre os argilominerais, para ocasionar a formação de compostos cimentantes, como os silicatos de cálcio. A cal hidratada é a mais utilizada para este fim, pois a cal virgem apresenta maior dificuldade de estoque e manipulação, principalmente em regiões mais úmidas (INGLES; METCALF, 1972).

A utilização da cal como agente estabilizante é mais eficaz quando adicionada a materiais finos (siltes ou argilas), quando o índice de plasticidade varia entre 10% a 50%, e sua estabilização química se dá em duas fases: a fase inicial rápida, podendo durar horas ou dias, e a fase lenta, que pode levar meses ou anos. Nas argilas a cal provoca variações em muitas de suas propriedades mecânicas, podendo destacar: o aumento de sua granulometria, devido à aglomeração ou floculação das partículas de argila, a redução da plasticidade, o aumento da resistência mecânica, a redução da compressibilidade tornando-o mais estável, a diminuição da contração e expansão linear e o aumento do coeficiente de

permeabilidade, devido às reações de floculação (CORDEIRO, 2007; CORRÊA, 2008).

A cal diminui a plasticidade, reduz a expansão e aumenta a resistência do solo, por ser constituído de um material fino. Consequentemente, produz uma reação química na mistura com outros materiais e ligantes, apresentando um aumento da superfície específica do material, proporcionando um considerável aumento na capacidade de saturação, diminuindo, assim, o peso específico aparente seco máximo (ARAÚJO *et al.* 2008).

Oliveira (2000), afirma que quando se mistura cal ao solo são processados vários tipos de reações que modificam as suas características. Admite-se que as mais importantes são a troca catiônica, floculação, ação de cimentação por reações pozolânicas e carbonatação.

2.8.1 Cal

A cal não encontra-se pronta na natureza, sua produção começa com a extração de rochas calcárias que são britadas e levadas a um forno onde ocorre a calcinação, dando origem a cal. A cal pode ser utilizada para diversos fins e devido a presença de grandes reservas de calcários no Brasil, faz com que seu uso tenha grande intensidade, mesmo que ainda incipiente se comparado aos países mais desenvolvido (ABPC, 2008).

A cal é classificada como um aglomerante hidráulico, ou seja, possui boa resistência após o endurecimento na presença de água, sendo essa característica importante no solo (FREITAS JUNIOR, 2013).

2.8.1.1 Cal Virgem

De acordo com NBR 6453, a cal virgem, também conhecida como cal viva ou cal ordinária, é o produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-

magnesianas. A cal virgem é um produto composto por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio mais óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 a 1200 °C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos (ABNT, 2003).

MINASCAL (2012) descreve que a qualidade comercial de uma cal depende das propriedades químicas do calcário e da qualidade da queima. É classificada conforme o óxido predominante, em: cal virgem cálcica (com óxido de cálcio entre 100% e 90% do óxido total presente); cal virgem magnésiana (com teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% do óxido total presente); e cal virgem dolomítica (com óxido de cálcio entre 65% e 58% do óxido total presente).

2.8.1.2 Cal Hidratada

A NBR 7175 descreve a cal hidratada como um pó seco obtido pela hidratação da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Esta norma classifica os tipos de cal presentes no mercado como cal hidratada CH-I, CH-II e CH-III. A classificação leva em consideração o nível de pureza do material, sendo a CH-I com o maior nível e CH-III com o menor nível. A NBR 7175 ainda especifica que a cal hidratada deve ser designada de acordo com os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, de exigências químicas e físicas mínimas (ABNT, 2003). Na Tabela 2 estão apresentadas as exigências químicas e na Tabela 3, as exigências físicas mínimas da cal hidratada.

Tabela 2 - Exigências Químicas e Físicas da Cal Hidratada (NBR 7175)

Exigências Químicas				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
Anidrido carbônico (CO ₂)	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaOt + MgOt)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: ABNT (2003).

Tabela 3- Exigências Físicas da Cal Hidratada (NBR 7175)

Exigência Físicas				
Requisitos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira Ø 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
Finura (% retida acumulada)	Peneira Ø 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
	Retenção de água	≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
	Incorporação de areia	≥ 3,0%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
	Plasticidade	≥ 110	≥ 110	≥ 110
	Estabilidade	Ausência de cavidades ou protuberâncias		

Fonte: ABNT (2003).

De acordo com MINASCAL (2012), a cal hidratada é utilizada como aglomerante no setor da construção civil, sendo muito difundida em argamassas para assentamento de tijolos e revestimento de paredes, devido a algumas de suas características, como trabalhabilidade, plasticidade e durabilidade das argamassas. A cal hidratada tem características aglomerantes assim como o cimento, sendo que, enquanto o cimento reage com água em uma reação de hidratação, o endurecimento da cal hidratada ocorre pelo contato com o ar. Essa reação transforma a cal num carbonato tão sólido quanto o calcário que a originou.

2.9 REAÇÕES SOLO-CAL

De acordo com Pomatti (2000), a adição de cal aos solos de granulometria fina e na presença de água causa diversas reações químicas. A troca iônica, floculação e aglomeração causam um melhoramento imediato na plasticidade e trabalhabilidade do material, mas é desenvolvida pouca resistência permanente. As reações pozolânicas provocam a formação de agentes cimentantes, produzindo assim aumentos na resistência e durabilidade com o passar do tempo. A carbonatação é a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono do ar atmosférico.

Segundo Carvalho (1990), a reação pozolânica depende diretamente do tempo, pH do solo, teor de matéria orgânica, presença de carbonatos e tipo de argilomineral. No caso do pH, solos com pH mais elevado tendem a reagir melhor. A matéria orgânica tem um efeito deletério para com a reação pozolânica, a ponto de se afirmar que solos com um teor de matéria orgânica acima de 5% não servem para ser estabilizados com cal.

A carbonatação é de alta importância para a consecução dos objetivos da estabilização, sua resultante cimentante é a combinação do óxido de cálcio do hidróxido com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar existentes nos poros do solo e da cal hidratada, bem como na água presente. A reação tende a refazer o carbonato de cálcio, um novo corpo sólido que entrelaça com os demais constituintes do solo e compacta o sistema. Isto ocorre porque com o aparecimento do carbonato, há também o aparecimento de grãos de dimensões bem maiores, face a diferença das estruturas cristalinas unitárias entre o carbonato e o hidróxido de cálcio (GUIMARÃES, 1971; GUIMARÃES, 2002).

2.10 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL

Johann *et al.* (2016) estudaram a influência da quantidade de cal, umidade e porosidade sobre a resistência à compressão simples (q_u) e sobre a rigidez inicial

(Go) de um solo siltoso estabilizado com cal, assim verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa de q_u e G_o . Para atingir os objetivos desta pesquisa os autores realizaram ensaios de q_u e ensaios para a medida de G_o . A pesquisa analisou misturas solo-cal aos 90 dias de cura com os teores de 3%, 5%, 7% e 9% de cal. Os resultados dos ensaios demonstram que q_u e G_o crescem linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da sua porosidade. Assim, os autores concluíram que a relação vazios/quantidade de cal demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa de q_u e G_o .

Cunha (2016) estudou a compressibilidade de um solo da Formação Guabirota estabilizado com cal hidratada (CH-III). Desta forma, este trabalho avaliou o efeito da adição de cal nos teores de 3%, 6%, 8% e 16%, em amostras de solo da Formação Guabirota, para verificar o comportamento do material utilizado em relação ao processo de adensamento unidimensional, através do ensaio de compressão edométrica. Neste trabalho, o autor verificou que os solos contendo 6% e 8% de cal apresentaram reduções imediatas nos recalques devido à aplicação de tensões normais, em misturas feitas sem tempo de cura. O autor constatou também, que a longo prazo o solo contendo 16% de cal pode oferecer resultados satisfatórios em relação ao deslocamento vertical ocorrido devido à aplicação de tensões normais ao solo quando comparado com o solo sem adição de cal.

Bordignon (2015) em sua pesquisa analisou o comportamento mecânico por meio de ensaios de resistência à compressão simples do solo típico da região do município de Curitiba/PR estabilizado quimicamente com cal hidratada (CH-III). Em sua pesquisa o autor selecionou uma quantidade de amostra de solo da região a fim de verificar a relação dos teores de cal misturada ao solo nas porcentagens de 3%, 6%, 8% e 16%, e os tempos de cura de 0, 7, 14, 28 e 56 dias. O autor verificou que as misturas solo-cal estudadas apresentaram comportamento aceitável pelas normas vigentes para utilização como camadas de sub-base de pavimentação.

Guérios (2013), estudou um solo da região do município de Curitiba/PR, adicionando 2%, 5% e 10% de cal hidratada. Dentre as três porcentagens analisadas pelo autor, a que apresentou resultados melhores foi a mistura solo-cal com 10% de adição de cal, com um aumento considerável na resistência à

compressão simples, e na resistência ao cisalhamento, melhor trabalhabilidade, maior coesão, e melhora na saturação da mistura do material.

Bueno (2011), em sua pesquisa analisou alguns fatores que podem afetar a durabilidade de misturas solo-cal. Em sua dissertação o autor apresenta resultados de um estudo laboratorial do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal cálcica e com cal dolomítica. O estudo incluiu ensaios de compactação, difratometria de Raios-X e resistência à compressão simples do solo e das misturas solo-cal e solo-cal contaminado com agentes químicos (foram utilizados quatro tipos de fertilizantes químicos de uso comum na agricultura). A pesquisa adotou teores de 1% de fertilizante e 4% de cal, os tempos de cura foram de 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias sob duas condições: cura em câmara sem controle de umidade e cura em câmara úmida a fim de avaliar a influência da perda de umidade sobre o ganho de resistência. Os resultados desta pesquisa demonstraram que a adição de fertilizantes químicos diminuiu o ganho de resistência em até 13% em misturas com cal dolomítica e até 36% com cal cálcica. O autor ainda relata que o ganho de resistência com cal cálcica foi o dobro do ganho com cal dolomítica, e as misturas com cal dolomítica sujeitas à cura úmida tiveram maiores ganhos em todos os tempos de cura, apesar de pouco significativos.

Silvani (2013) em sua pesquisa analisou a influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas solo-cinza volante-cal. A autora realizou ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral em corpos de prova com 25% de cinza volante, teores de 3, 5 e 7% de cal e curados a 20, 27, 35 e 50°C por 28 dias. Os resultados encontrados pela autora demonstraram que ambas as resistências estudadas aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cal. A razão obtida nesta pesquisa entre a resistência a tração e a compressão foi de 0,18, 0,14, 0,20 e 0,19 para as temperaturas de 20, 27, 35 e 50°C, respectivamente.

3 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo estão expostas informações sobre os materiais empregados, os métodos e equipamentos utilizados para a realização deste trabalho.

3.1 MATERIAIS

Com o intuito de relacionar os dados obtidos nesta pesquisa com os dados obtidos no trabalho de Bordignon (2015), foram utilizados os mesmos materiais em ambos os trabalhos.

3.1.1 Solo

O solo estudado neste trabalho é oriundo da formação Guabirotuba, o qual é um solo representativo da região metropolitana do município de Curitiba/PR, sendo comumente caracterizado como argila siltosa ou silte argiloso. Em março de 2014, uma amostra deste solo foi coletada por Bordignon (2015) dentro das dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, sede Ecoville, a qual também foi utilizada neste trabalho. A amostra de solo foi coletada a uma profundidade de aproximadamente 2 metros.

A escolha da amostra se deu em função da viabilidade de extração da mesma em área próxima ao laboratório, estando visivelmente sem contaminações e possuindo uniformidade na textura e na cor. Na Figura 4 apresenta-se o solo coletado e armazenado.



Figura 4 - Solo Coletado e Armazenado
Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Cal

A cal empregada nesta pesquisa é do tipo calcítica hidratada CH-III, da marca ITABRANCA, fabricada pela EB Indústria e Comércio de Cal Ltda. A utilização desta cal encontra-se em conformidade com as NBR 6473 (ABNT, 2003) e NBR 7175 (ABNT, 2003). De acordo com Bordignon (2015), a cal CH-III foi escolhida para ser utilizada em seu trabalho por ser um tipo de cal mais comercializada e empregada na região metropolitana do município de Curitiba/PR. Na Figura 5 apresenta-se a cal armazenada e vedada com saco plástico em potes de vidro para evitar a ocorrência de carbonatação.



Figura 5 - Armazenamento da Cal
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Água

Para o desenvolvimento dos ensaios e moldagem dos corpos de prova foi utilizada água potável fornecida pela SANEPAR, empresa de abastecimento de água do estado do Paraná. Água destilada foi utilizada nos ensaios de caracterização, de acordo com as especificações contidas em suas respectivas normas.

3.2 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

A seguir estão apresentados de forma clara e objetiva os métodos utilizados neste trabalho, traços analisados, equipamentos e programação dos ensaios. Todos os ensaios desta pesquisa foram executados nos laboratórios de Geotecnia e de Materiais de Construção, ambos do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, sede Ecoville.

3.2.1 Preparação da Amostra de Solo

A NBR 6457 padroniza a preparação de amostras de solo para ensaios de caracterização e compactação (ABNT, 1986). De acordo com Bordignon (2015), após a coleta da amostra, o solo foi seco ao ar, desagregado, peneirado em peneira normatizada pela ABNT de número 4 (4,8mm), conforme recomenda a norma anteriormente citada. Em seguida, a amostra foi acondicionada em tambores plásticos com tampa. Na Figura 6 ilustra-se a amostra de solo preparada para o seu uso nos ensaios.



Figura 6 - Amostra do Solo Preparada para os Ensaios
Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Determinação da Umidade Higroscópica

A umidade higroscópica é a quantidade máxima de água, em percentagem, que o solo é capaz de absorver da atmosfera e se manter em equilíbrio com o ambiente. Quanto mais arenoso um solo for, menor será sua umidade higroscópica. Este ensaio consiste na coleta de algumas amostras do solo, dispostas em cápsulas, as quais são pesadas antes e após secagem na estufa (descontando-se o peso das cápsulas). Este procedimento segue os parâmetros da NBR 6457 (ABNT, 1986).

Para a realização deste ensaio, foram utilizadas três cápsulas metálicas, uma balança da marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01\text{g}$ e uma estufa de marca LUCADEMA. Na Figura 7 apresentam-se a estufa utilizada para o acondicionamento e as cápsulas com as amostras.



Figura 7 - Estufa e Cápsulas para o Ensaio da Determinação da Umidade Higroscópica
Fonte: A autoria própria.

3.2.3 Ensaio de Determinação da Massa Específica Real dos Grãos

A NBR 6508 estabelece alguns procedimentos para a realização deste ensaio (ABNT, 1984). Através deste ensaio foi obtida a massa específica real dos grãos do solo, onde foram utilizados dois picnômetros de 500ml, um fogão de marca Built e uma balança da marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01g$. Na Figura 8 apresenta-se uma das etapas deste ensaio.



Figura 8 - Ensaio de Determinação da Massa Específica Real dos Grãos
Fonte: A autoria própria.

3.2.4 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é um ensaio de caracterização física do solo natural, o qual é realizado por peneiramento e sedimentação. Esta análise foi executada baseada na NBR 7181, a qual divide o ensaio em 2 etapas: a primeira etapa consiste no peneiramento da fração grossa e fina, já a segunda etapa consiste na sedimentação da fração fina, composta de silte e argila (ABNT, 1988).

Na primeira etapa foram utilizadas as peneiras normatizadas pela ABNT de número 4 (4,75mm), 10 (2mm), 16 (1,2mm), 30 (0,6mm), 40 (0,425mm), 60 (0,25mm), 100 (0,15mm), 200 (0,075mm) e um agitador de peneira eletromecânico da marca LUCADEMA. Na segunda etapa, foi utilizado um defloculante hexametáfosfato de sódio, para ajudar na desagregação das partículas de solo. Ainda nesta etapa, foi utilizada água destilada, um termômetro de marca Minipa e um densímetro de marca RIVATERM.

Em ambas as etapas foi utilizada uma amostra do solo destorroada e uma balança da marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01g$. Na Figura 9 apresenta-se a amostra do solo destorroada e na Figura 10 apresentam-se os ensaios de peneiramento e sedimentação.



Figura 9 - Amostra Destorroada do Solo
Fonte: Autoria própria.



Figura 10- Ensaio de Peneiramento e Sedimentação
Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Limites Físicos de Consistência

Os limites físicos de consistência do solo, ou limites de Atterberg, fornecem informações sobre o material, quanto à sua trabalhabilidade, variação do volume e absorção de água. A NBR 6459 padroniza o procedimento do ensaio para a determinação do limite de liquidez (LL), enquanto a NBR 7180 para o limite de plasticidade (LP). Através dos dados obtidos nestes ensaios se obtém o índice de plasticidade (IP).

O LL é a umidade a partir da qual o solo passa a se comportar como líquido. O LL é determinado pelo teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura (aproximadamente 13mm) sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande (ABNT, 1984). Para a realização deste ensaio foram realizadas cinco tentativas, cada tentativa com uma porcentagem de umidade. Sendo assim, em cada caso, a ranhura se fecha com diferentes números de golpes, o que permite estimar a umidade correspondente a 25 golpes.

Foi utilizada uma balança da marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01g$, um aparelho de Casagrande da marca Bender, um cinzel, água destilada, cápsulas metálicas e uma estufa de marca LUCADAMA. Na Figura 11 apresenta-se o equipamento para o ensaio da determinação do LL.



Figura 11 - Equipamento para o Ensaio de Determinação do LL
Fonte: Autoria própria.

O LP é a umidade de transição entre os estados plástico e semi-sólido do solo, ou seja, a umidade em que o solo deixa ou começa a tornar-se quebradiço (ABNT, 1988). Em laboratório o limite de plasticidade é obtido determinando-se o teor de umidade no qual um cilindro de um solo com 3mm de diâmetro e cerca de 10cm de comprimento apresenta fissuras.

Para este ensaio foi utilizada uma balança da marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01g$, água destilada, cápsulas metálicas, uma placa de vidro esmerilhada, uma estufa de marca LUCADEMA e como referência um haste metálica de 100mm de comprimento com 3mm de diâmetro. Na Figura 12 apresenta-se o ensaio para a determinação do LP.

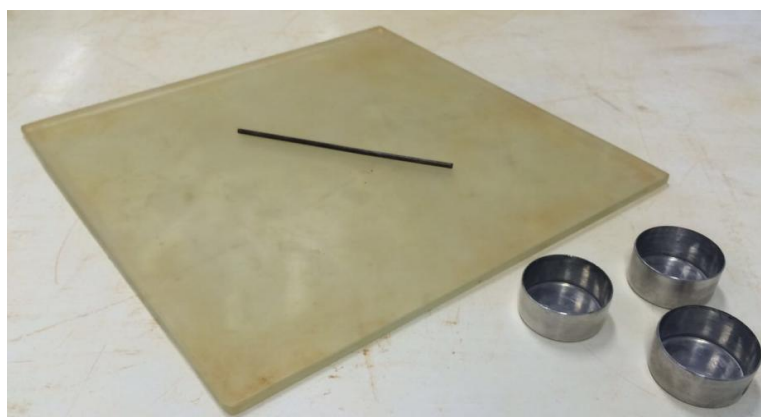


Figura 12 - Equipamento para o Ensaio de Determinação da LP
Fonte: Autoria própria.

O IP determina a propriedade de plasticidade de um solo, ou seja, quanto maior for o IP, maior a probabilidade da umidade do solo ser suficiente para que o mesmo se comporte como plástico. Em outras palavras, o índice de plasticidade representa a quantidade de água necessária a acrescentar em um solo, para que este passe do estado plástico ao líquido. O IP é definido como a diferença entre o LL e LP. Na Figura 13 está apresentada de maneira sucinta a relação entre os limites de consistência do solo.

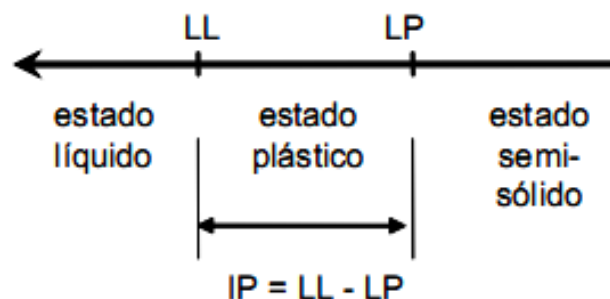


Figura 13 - Limites de Consistência do Solo
Fonte: Greco (2007).

3.2.6 Ensaio de Compactação

Para este trabalho foi realizado o ensaio de Proctor normal, o qual permitiu a obtenção do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 7182 (ABNT, 1986). Foi utilizada uma balança de marca RADWAG com precisão de $\pm 0,01$ g (para pesagens até 2kg), uma balança de marca Líder com precisão de ± 2 g (para pesagens até 20kg), um molde cilíndrico (com base e colarinho) com volume de 1000cm^3 , um soquete cilíndrico de 2500g, um extrator, quinze cápsulas metálicas e uma estufa de marca LUCADEMA.

O ensaio de Proctor normal inicia-se com a adição de água na amostra homogeneizando-a até verificar-se uma certa consistência. Em seguida, compacta-se uma camada de aproximadamente um terço do molde, aplicando-se 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de

uma altura de 30,5cm. Repete-se esta etapa mais duas vezes para preencher totalmente o molde (ABNT, 1986).

Remove-se o colarinho e a base e pesa-se o conjunto cilindro mais solo úmido compactado. Retira-se a amostra do molde com auxílio do extrator, e partindo-a ao meio, coleta-se três amostras colocando-as em cápsulas e pesando-as antes e após secagem na estufa. Desmancha-se o material compactado até que possa ser passado pela peneira de número 4 (4,8mm) e mistura-se com o material restante. Acrescenta-se água (aproximadamente 2% da massa original de solo, em peso), homogeniza-se o solo e repete-se o processo por mais quatro vezes (ABNT, 1986). Na Figura 14 apresentam-se os equipamentos utilizados no ensaio de compactação.



Figura 14 - Equipamento para o Ensaio de Compactação
Fonte: Autoria Própria.

3.2.7 Ensaio de pH

É de grande importância saber o pH de uma mistura solo-cal, pois um determinado pH indica que a porcentagem de cal escolhida é suficiente para que as reações pozolânicas, necessárias para o aumento da resistência da mistura solo-cal, ocorram. Neste ensaio foram realizadas leituras do pH das misturas solo-cal, estudadas neste trabalho, com a adição de água destilada na relação 1:1. Esta solução foi misturada em potes de plástico, e a leitura foi feita com a utilização de

um pHmetro de marca JKI com precisão de $\pm 0,1$ pH. Na Figura 15 apresenta-se o ensaio de pH.



Figura 15 - Medição do pH das Misturas Solo-cal
Fonte: Autoria própria.

3.2.8 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Johann (2013) relata que em ensaios de determinação direta da resistência à tração dos solos, facilmente ocorrem problemas relacionados à forma de prender as amostras nas extremidades, para que possam ser tracionadas, devido a concentração de tensões no corpo de prova. Devido a estes problemas, a resistência à tração de solos tem sido determinada através de métodos que utilizam a aplicação de outros esforços, que permitem interpretar os resultados e obter indiretamente o valor desejado.

Para esta pesquisa foi utilizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral baseado na NBR 7222, o qual consiste no carregamento de amostras cilíndricas no sentido de seu diâmetro (ABNT, 1994). De acordo com Johann (2013), o ensaio de resistência à tração por compressão diametral é de fácil execução e amplamente utilizado no meio científico. A resistência à tração é determinada através da Equação 1:

$$qt = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (1)$$

Onde:

qt : resistência à tração;

P : carga máxima suportada pelo corpo de prova;

D : diâmetro do corpo de prova, e;

H : altura do corpo de prova.

Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica de marca EMIC. Na Figura 16 apresenta-se o ensaio de resistência à tração e os corpos de prova rompidos.

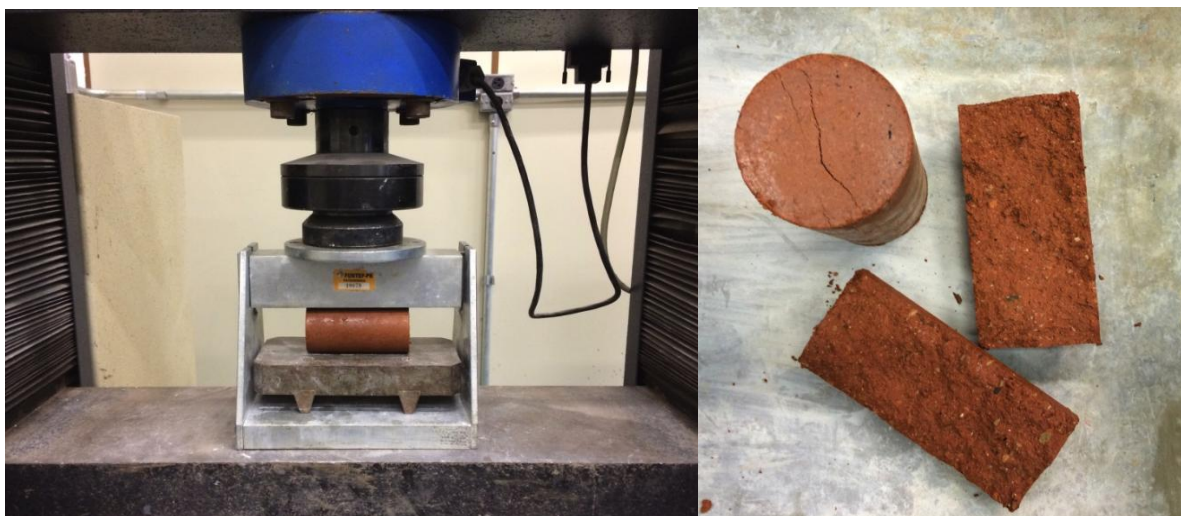


Figura 16 - Ensaio de Resistência à Tração
Fonte: Autoria própria.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DAS MISTURAS SOLO-CAL

Este trabalho seguiu o planejamento experimental das misturas solo-cal adotado por Bordignon (2015).

3.3.1 Dosagem das Misturas Solo-cal

Para este trabalho foram moldados quatro corpos de prova para cada teor de cal e para cada tempo de cura, sendo os teores de cal de 3%, 6%, 8% e 16%, e os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias, totalizando em sessenta e oito corpos de prova conforme apresentado na Tabela 4. Para o teor de 0% de cal, foram moldados apenas quatro corpos de prova, pois para este teor de cal não é necessário esperar a cura do corpo de prova.

Tabela 4 - Quantidade de Corpos de Prova por Teor de Cal e Tempo de Cura

Teor de Cal	Tempo de Cura					Total
	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	
0%	4	-	-	-	-	4
3%	-	4	4	4	4	16
6%	-	4	4	4	4	16
8%	-	4	4	4	4	16
16%	-	4	4	4	4	16
Total	4	16	16	16	16	68

Fonte: Autoria própria.

Bordignon (2015) em seu estudo realizou um ensaio de compactação para cada mistura solo-cal, estando os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Umidade Ótima e Peso Específico Aparente Seco

Parâmetro	Teor de Cal					Média
	0%	3%	6%	8%	16%	
ω (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53	26,6
γ_d (g/cm ³)	1,515	1,51	1,491	1,509	1,481	1,5

Fonte: Adaptado de Bordignon (2015).

Levando em consideração o volume do corpo de prova, e baseando-se nos dados apresentados na Tabela 5 (média do teor de umidade ótima (ω) e média do peso específico aparente seco (γ_d)), conclui-se que cada corpo de prova deverá

pesar aproximadamente 372g. O mesmo procedimento para obtenção do peso do corpo de prova foi realizado por Bordignon (2015).

A quantidade de cal hidratada em pó para cada mistura foi calculada em relação ao peso do solo natural seco utilizada, e a quantidade de água foi calculada em relação ao peso do solo natural seco com a adição da massa da cal hidratada em pó. As massas de solo natural seco, cal e água que compõem as misturas solo-cal estudadas neste trabalho estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dosagem das Misturas Solo-Cal

Material	Teor de Cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
Solo (g)	293,72	285,14	277,04	271,89	253,07
Cal (g)	0,00	8,58	16,68	21,83	40,65
Água (g)	78,34	78,34	78,34	78,34	78,34
Mistura (g)	372,06	372,06	372,06	372,06	372,06

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Moldagem e Tempo de Cura dos Corpos de Prova

A confecção dos corpos de prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, embalagem, acondicionamento, armazenagem e cura. O solo natural juntamente com a cal hidratada em pó, em suas respectivas dosagens, foram misturadas em uma bandeja plástica até que a mistura atingisse uma coloração uniforme, indicando a homogeneidade do material. Em seguida, foi adicionada água potável, repetindo todo o processo de mistura até que o material se tornasse homogêneo.

Após o processo de mistura dos materiais, três pequenas porções da mistura foram retiradas, colocadas em cápsulas e acondicionadas em estufa por 24h, para que se estabelecesse o teor de umidade da mistura.

Para este trabalho foi utilizado um molde desenvolvido por Bordignon (2015), o qual possui 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Neste molde foi compactada uma camada de aproximadamente um terço da massa da mistura solo-cal,

aplicando-se golpes sobre a superfície da camada, com o auxílio de um soquete também adaptado. Esta etapa foi repetida mais duas vezes para que se preenchesse totalmente o molde. Na Figura 17 apresenta-se o molde utilizado para moldar os corpos de prova para esta pesquisa.



Figura 17 - Molde Adaptado
Fonte: Autoria Própria.

Após a compactação, o corpo de prova foi imediatamente retirado do molde com o auxílio de um extrator adaptado para o mesmo. Em seguida, foram pesados e medidos as alturas dos corpos de prova, e anotando os seus valores respectivamente. Na sequência, o corpo de prova foi embalado em plástico filme e colocado dentro de um saco plástico amarrado, adequadamente identificado. Essa vedação foi utilizada para que se garantisse que o corpo de prova se mantivesse com a umidade inicial.

Os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida, a qual possui temperatura e umidades controladas, durante os seus respectivos tempos de cura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados e discussões dos ensaios abordados nesta monografia.

4.1 UMIDADE HIGROSCÓPICA

Os dados do ensaio de determinação da umidade higroscópica (Wh) do solo natural estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da Determinação da Umidade Higroscópica do Solo Natural

Identificação	Cápsula			Wh(%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 070	6,95	19,04	18,43	5,31
A 201	7,19	17,82	17,29	5,25
A 029	7,52	17,86	17,33	5,40

Fonte: Autoria própria.

Por meio dos dados apresentados na Tabela 7 é possível notar que nenhuma cápsula apresentou resultado discrepante em relação às demais, logo não foi necessário o descarte de nenhum resultado. A média de Wh obtida neste ensaio foi de 5,3% com desvio padrão de 0,07%, ou seja, a amostra de solo da Formação Guabirotuba utilizada nesta pesquisa após o processo de secagem a céu aberto (secagem ao ar) manteve uma umidade residual de aproximadamente 5,3%.

A Wh tende a ser maior à medida em que o solo for mais argiloso, enquanto em solos de granulometrias grossas (areias e pedregulhos) ela é praticamente desprezível (KORMANN, 1997). Logo, é possível afirmar que esta amostra possui em sua composição material de granulometria fina (silte e/ou areia).

4.2 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

Os dados do ensaio de determinação da massa (ou densidade) real dos grãos (Gs) do solo natural estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados do Ensaio de Massa Específica Real dos Grãos

Determinação da Massa Específica Real dos Grãos

Picnômetro	A	B	C
Temperatura (°C)	26,0	26,0	21
Picnômetro (g)	122,18	122,32	121,89
Picnômetro + Solo Seco (g)	222,14	222,37	222,50
Picnômetro + Água (g)	597,04	596,72	597,65
Picnômetro + Solo + Água (g)	653,36	652,32	653,90
Solo Seco (g)	99,96	100,05	100,61
Fator de Correção (K)	0,9968	0,9968	0,9980
Gs (g/cm ³)	2,283	2,244	2,263

Fonte: Autoria própria.

O fator de correção (K) utilizado neste ensaio está de acordo com o Quadro 1, o qual relaciona o peso específico da água em função da temperatura.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	-	0,9996	0,9995	0,9994	0,9993	0,9991	0,9990	0,9988	0,9986	0,9984
20	0,9982	0,9980	0,9978	0,9976	0,9973	0,9971	0,9968	0,9965	0,9963	0,9960
30	0,9957	0,9954	0,9951	0,9947	0,9944	0,9941	0,9937	0,9934	0,9930	0,9926

Quadro 1 - Peso Específico da Água em Função da Temperatura (valores em gf/cm³)

Fonte: ABNT (1984).

Por meio dos dados obtidos neste ensaio, nota-se que não foi necessário o descarte de nenhum resultado do picnômetro, os Gs obtidos não diferiram mais que 0,02g/cm³ conforme as recomendações da NBR 6508. Deste modo, a massa específica real dos grãos (Gs) desta amostra foi de 2,263g/cm³, obtida pela média dos três ensaios realizados apenas com o solo natural seco ao ar.

4.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica consiste na determinação dos diâmetros das diversas partículas existentes no solo. Neste trabalho a granulometria foi determinado por peneiramento e por sedimentação para o solo em seu estado natural.

4.3.1 Análise Granulométrica por Peneiramento

Na Tabela 9 apresentam-se os dados obtidos por peneiramento.

Tabela 9 - Dados da Determinação da Granulometria por Peneiramento

Peneira	Material Retido		Material Passante (%)
	Peso (g)	Percentual (%)	
4	0,00	0,00	100,00
10	1,74	1,74	99,65
16	2,45	2,45	95,48
30	6,50	6,49	89,00
40	3,55	3,55	85,46
60	6,08	6,07	79,40
100	10,04	10,03	69,40
200	8,63	8,62	60,80
Fundo	61,11	61,05	-
Total	100,10	100,00	-

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Análise Granulométrica por Sedimentação

Por meio do ensaio de caracterização granulométrica por sedimentação obteve-se os seguintes dados descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados da Determinação da Granulometria por Sedimentação

Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura (°C)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	Amostra total (%)
0,5	1,039	25,8	9,53	0,0644	65,55
1	1,037	25,8	9,93	0,0464	61,99
2	1,034	25,8	10,52	0,0338	56,64
4	1,032	25,8	10,91	0,0243	53,08
8	1,029	25,9	11,50	0,0177	47,77
15	1,027	26,1	11,90	0,0130	44,27
30	1,025	26,8	12,29	0,0093	40,96
60	1,024	27,3	14,49	0,0066	39,37
240	1,021	27,5	13,08	0,0034	34,10
560	1,019	28,2	13,48	0,0022	30,81
1440	1,018	28,1	13,67	0,0014	28,98

Fonte: Autoria própria.

O densímetro de bulbo simétrico utilizado foi calibrado nas seguintes escalas: temperatura de 20°C e graduado de 0,01, na faixa de 0,995 a 1,050. Os dados da calibração do densímetro estão descritos na Tabela 11, e na Figura 18 apresenta-se um gráfico que relaciona a altura de queda com as leituras do densímetro de bulbo.

Tabela 11 - Dados da Calibração do Densímetro

Altura de Queda x Leitura			
		Pescoço p (cm)	1,45
		h/2 (cm)	6,95
		Volume Vd (cm ³)	56,11
		Seção da Proveta A (cm ²)	28,80
Leitura	Distância M (cm)	$a = M+p+h/2$	$a' = a - Vd/2A$
1,050	0,00	8,41	7,43
1,040	1,96	10,37	9,39
1,030	3,80	12,21	11,23
1,020	5,79	14,20	13,22
1,010	7,76	16,17	15,19
1,000	9,80	18,21	17,23
0,995	10,88	19,29	18,31

Fonte: Autoria própria.

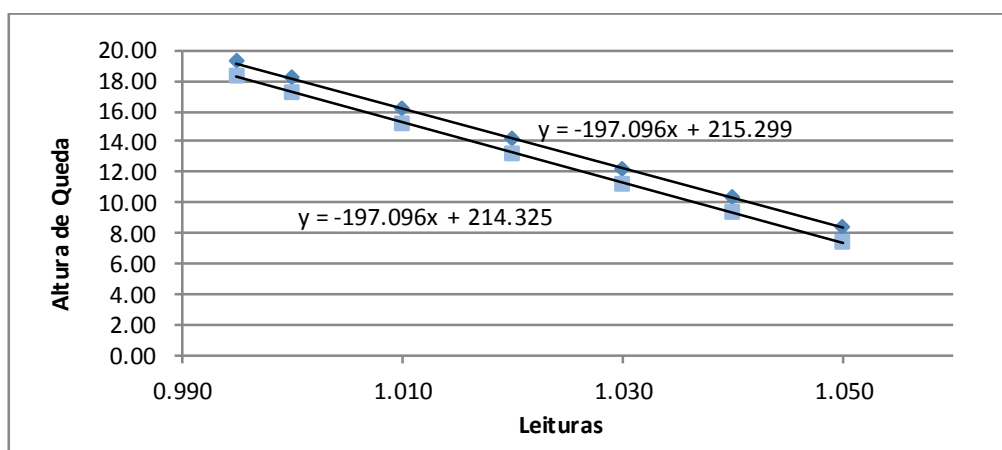


Figura 18 - Relação da Altura de Queda com a Leitura do Densímetro
Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Curva Granulométrica

Por meio dos dados obtidos nos ensaios de caracterização por peneiramento e por sedimentação foi possível determinar a curva granulométrica para esta amostra de solo natural da Formação Guabirotuba. Na Figura 19 apresenta-se a curva granulométrica.

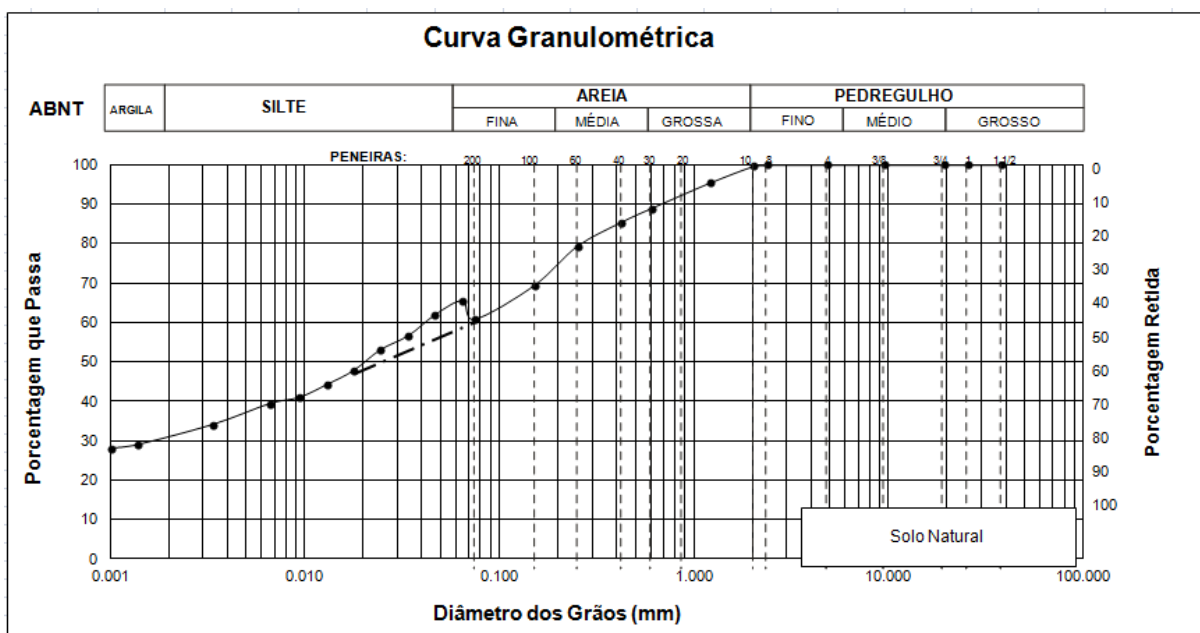


Figura 19 - Curva Granulométrica do Solo Natural
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a escala utilizada pela NBR 6502, a amostra estudada indicou um solo com as seguintes composições: 0% de pedregulho (acima de 2mm), 25% de areia (de 0,06 a 2mm), 34% de silte (de 0,002 a 0,06mm) e 31% de argila (abaixo de 0,002mm). Na Tabela 12 apresenta-se um resumo da composição granulométrica da amostra ensaiada.

Tabela 12 - Composição Granulométrica do Solo Natural

Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
31%	34%	10%	14%	11%	0%

Fonte: Autoria própria.

4.4 LIMITES FÍSICOS DE CONSISTÊNCIA

Para a obtenção dos limites físicos de consistência da amostra de solo utilizada por esta pesquisa, foram realizados os ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e determinação do índice de plasticidade (IP).

4.4.1 Limite de Liquidez

Os dados do ensaio do LL do solo natural estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados da Determinação do LL do Solo Natural

Identificação	Cápsula			Umidade (%)	Número de Golpes
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)		
A 048	7,67	12,81	11,01	53,89	18
A 008	7,05	17,76	14,37	46,31	25
A 045	6,20	16,30	13,41	40,08	30
A 033	7,65	20,01	16,63	37,64	37
A 056	7,54	13,10	11,60	36,95	39

Fonte: Autoria própria.

Com os dados da Tabela 13, traçou-se o gráfico apresentado na Figura 20, na qual é possível determinar que o LL desta amostra de solo natural é aproximadamente 46%.

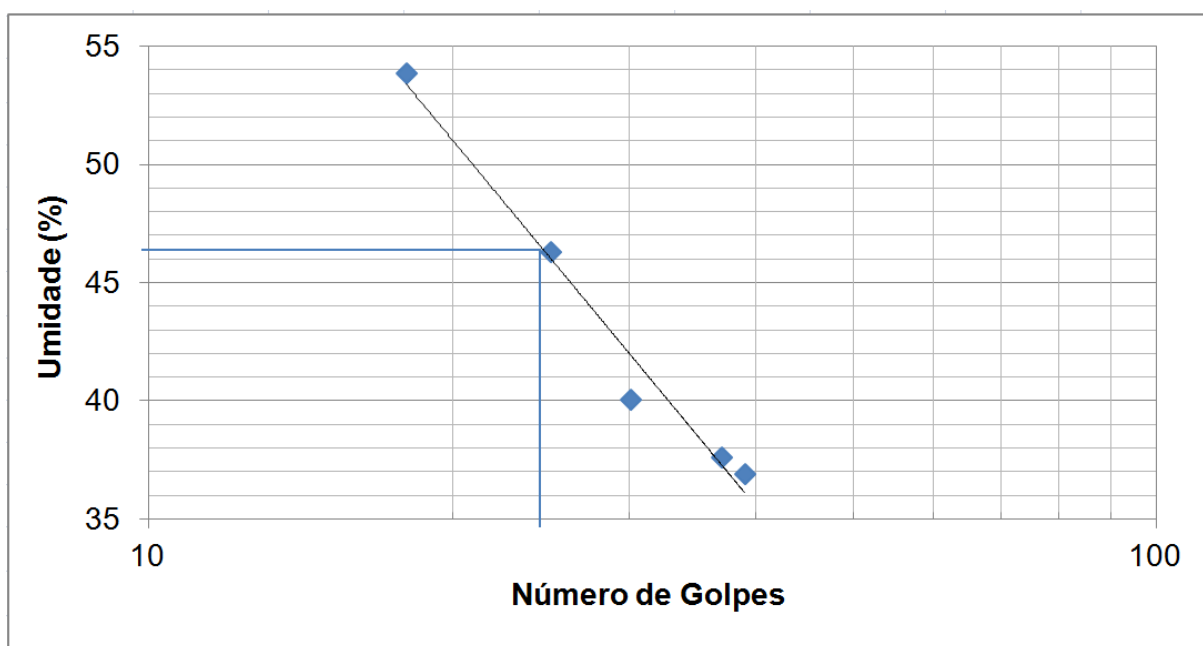


Figura 20 - LL do Solo Natural
Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 14 e Figura 21 apresentam-se os dados da determinação do LL do solo com adição de 3% de cal.

Tabela 14 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 3% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)	Número de Golpes
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)		
016 H	7,02	14,65	12,44	40,77	39
034 H	7,19	13,29	11,43	43,87	33
020 H	6,80	12,48	10,78	42,71	31
030 H	7,75	13,61	11,75	46,50	26
A 028	6,70	14,02	11,65	47,88	19

Fonte: Autoria própria.

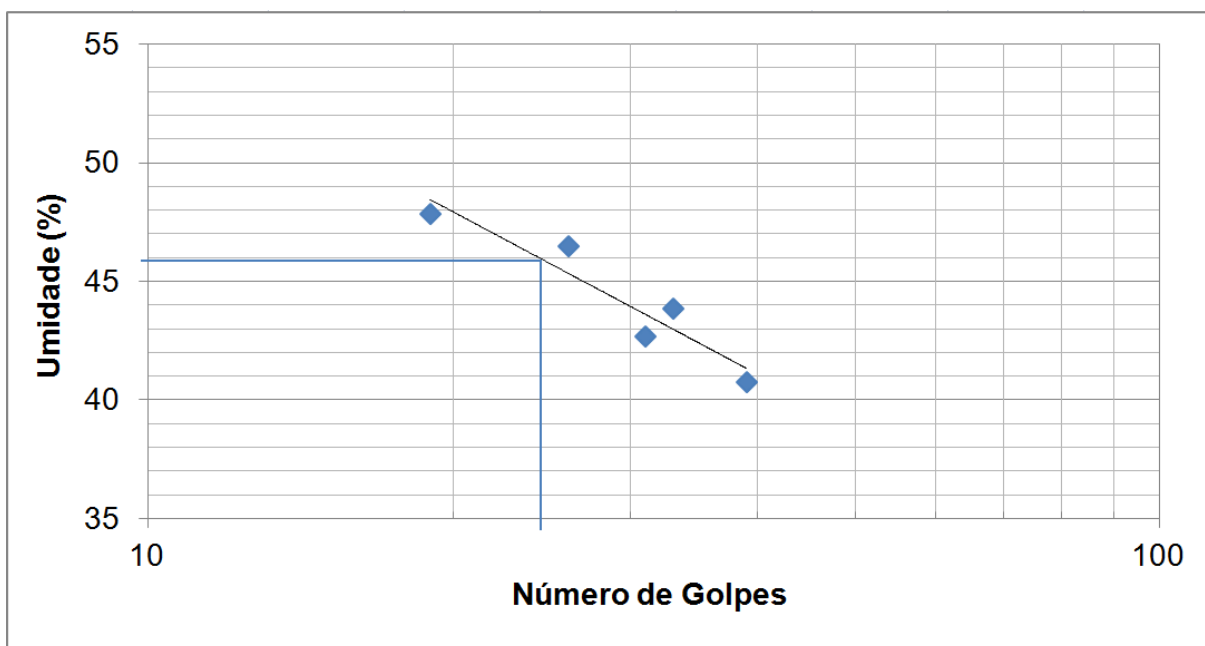


Figura 21 - LL do Solo com 3% de Cal
Fonte: Autoria própria.

Por meio da Figura 21, determina-se que o LL do solo com o teor de 3% de cal é aproximadamente 46%. Na Tabela 15 e Figura 22 apresentam-se os dados da determinação do LL do solo com adição de 6% de cal.

Tabela 15 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 6% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)	Número de Golpes
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)		
038 H	7,62	12,65	11,18	41,29	33
011 H	6,88	15,08	12,60	43,36	30
006 H	8,03	16,90	14,20	43,76	29
E 002	7,63	12,81	11,19	45,51	25
A 015	10,45	18,33	15,78	47,84	16

Fonte: Autoria própria.

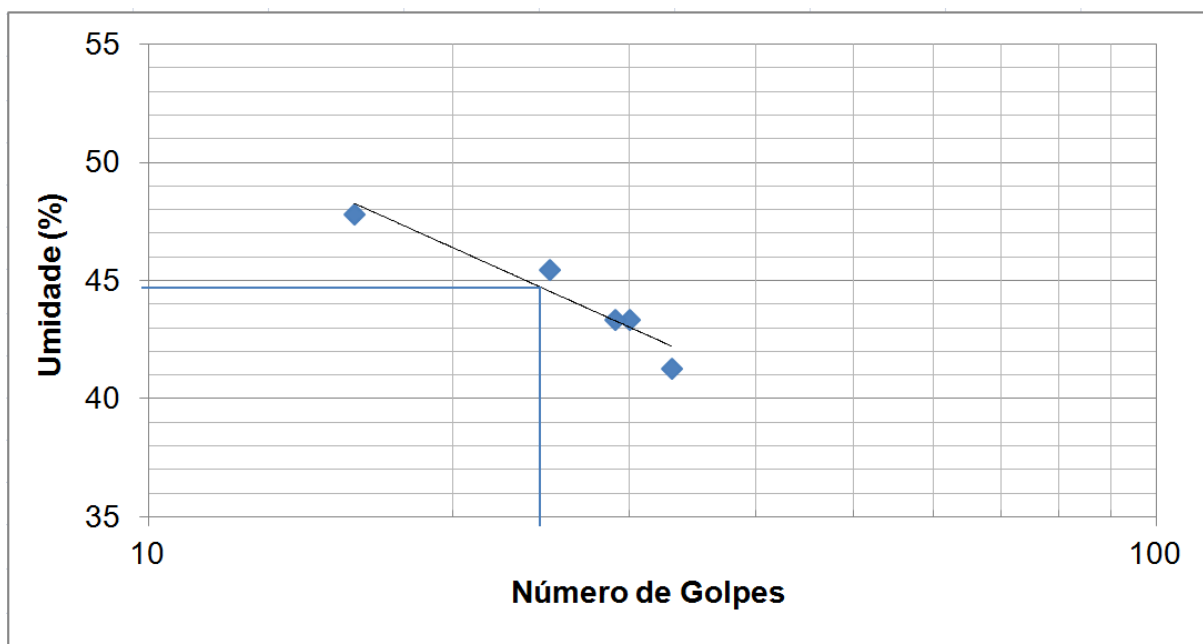


Figura 22 - LL do Solo com 6% de Cal
 Fonte: Autoria própria.

Por meio do gráfico apresentado na Figura 22, determinou-se que o LL do solo com teor de 6% de cal é aproximadamente 45%. Os dados do ensaio de LL do solo com adição de 8% de cal estão contidos na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 8% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)	Número de Golpes
	Vazia (g)	Solo Umido (g)	Solo Seco (g)		
033H	6,39	15,10	12,53	41,86	40
25 H	8,23	14,76	12,78	43,52	28
018 H	7,01	13,80	11,67	45,71	26
001 H	7,73	15,13	12,78	46,53	21
032 H	7,61	15,39	12,87	47,91	17

Fonte: Autoria própria.

Por meio dos dados da Tabela 17 traçou-se o gráfico para a determinação do LL do solo com teor de 8% de cal. O gráfico está demonstrado na Figura 21, a qual possibilitou determinar que o LL desta mistura é de aproximadamente 45%.

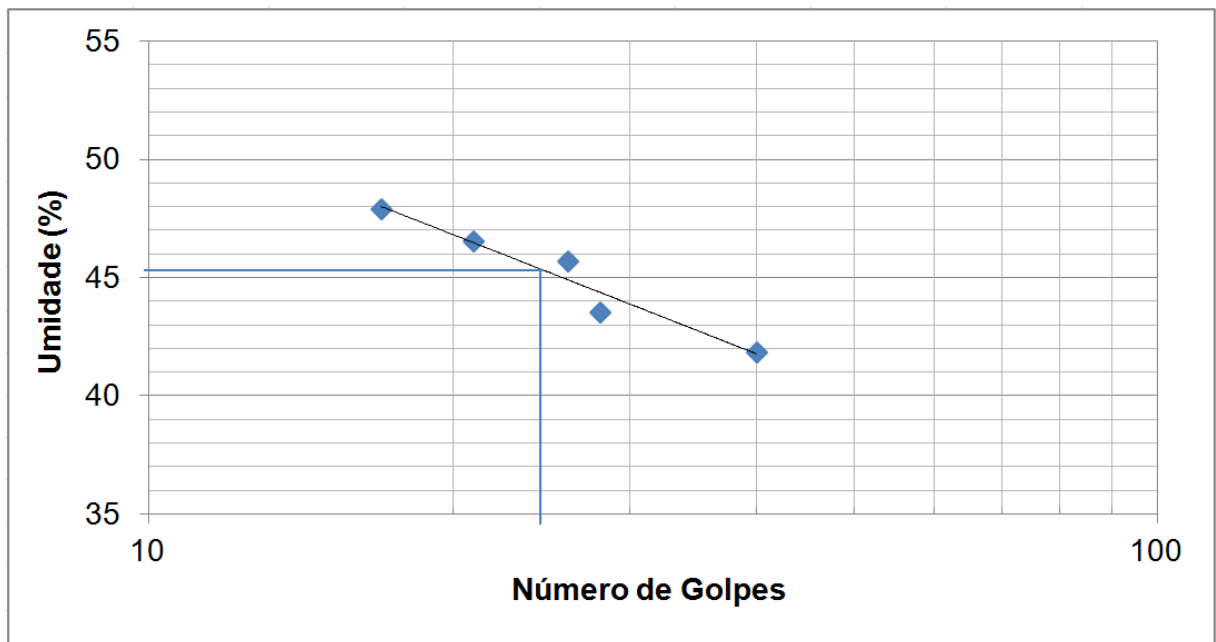


Figura 23 - LL do Solo com 8% de Cal
Fonte: Autoria própria.

Os dados do ensaio de LL para a mistura solo-cal com teor de 16% estão descritas na Tabela 17.

Tabela 17 - Dados da Determinação do LL do Solo com Adição de 16% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)	Número de Golpes
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)		
011 H	6,88	11,90	10,44	41,01	33
022 H	7,18	12,63	10,96	44,18	27
013 H	7,01	13,95	11,79	45,19	24
002 H	7,83	15,61	13,15	46,24	16
E 002	7,63	13,79	11,81	47,37	15

Fonte: Autoria própria.

Baseando-se nos dados da Tabela 18, desenhou-se o gráfico que relaciona o número de golpes com a umidade da mistura solo-cal com teor de 16%. Na Figura 24 apresenta-se o gráfico desta relação, e por meio deste é possível determinar que com 25 golpes a mistura solo-cal com teor de 16% de cal apresentou LL de aproximadamente 44%.

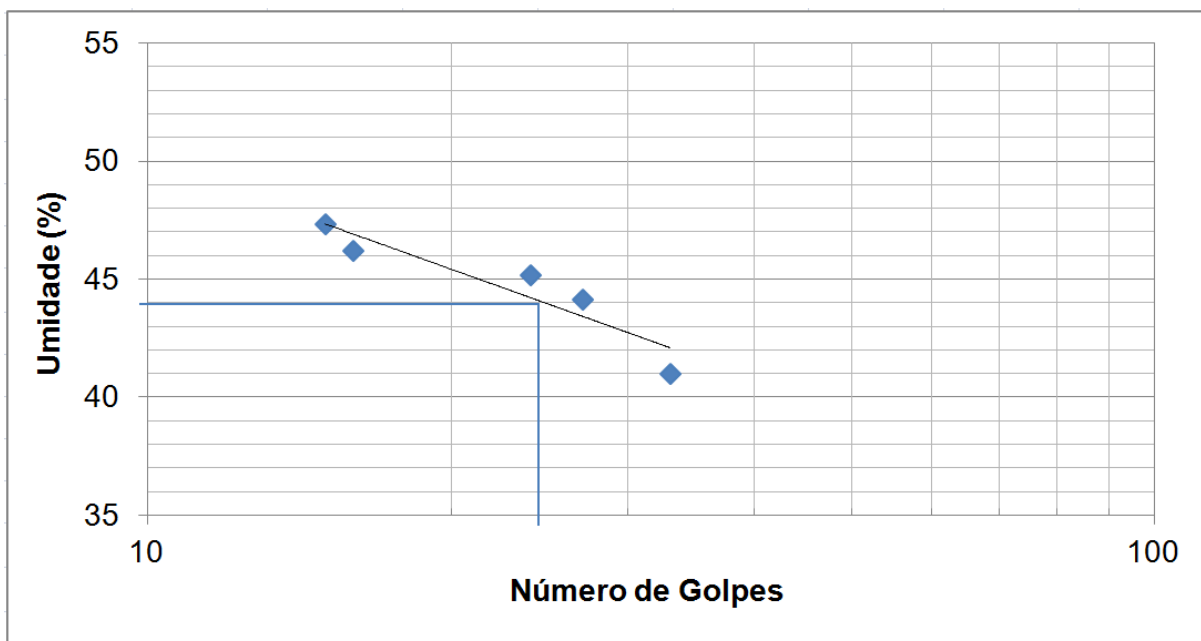


Figura 24 - LL do Solo com 16% de Cal
Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Limite de Plasticidade

Os dados do ensaio de determinação do LP do solo natural e das misturas solo-cal com teor 3%, 6%, 8% e 16% estão contidos na Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 respectivamente.

Tabela 18 - Dados da Determinação do LP do Solo Natural

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Umido (g)	Solo Seco (g)	
A 078	7,49	8,09	7,92	39,53
A 083	7,74	8,91	8,59	37,65
E 006	7,45	7,96	7,82	37,84
A 053	6,90	7,43	7,28	39,47
A 074	10,30	10,78	10,65	37,14

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 3% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 221	6,74	7,33	7,17	37,21
A 044	7,46	8,47	8,20	36,49
A 205	7,94	8,57	8,40	36,96
A 028	7,44	7,81	7,71	37,04
A 020	7,85	8,51	8,33	37,50

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 6% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
002 H	7,83	8,67	8,45	35,48
035 H	7,84	8,34	8,21	35,14
022 H	7,18	7,99	7,78	35,00
013 H	7,01	7,76	7,56	36,36
028 H	7,50	8,24	8,04	37,04

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 8% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
009 H	7,17	7,86	7,68	35,29
017 H	7,89	8,86	8,61	34,72
004 H	7,74	8,45	8,26	36,54
027 H	7,41	8,41	8,15	35,14
026 H	7,54	8,39	8,17	34,92

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 - Dados da Determinação do LP do Solo com Adição de 16% de Cal

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
006 H	8,03	8,68	8,52	32,65
A 015	10,45	11,07	10,91	34,78
038 H	7,62	8,37	8,18	33,93
035 H	7,84	8,70	8,48	34,37
028 H	7,50	8,15	7,99	32,65

Fonte: Autoria própria.

O LP de cada mistura solo-cal foi determinada pela média das umidades, e verificando de acordo com a sugestão da NBR 6459, nenhum resultado foi descartado, pois não variaram mais que 5% da média. O LP das misturas solo-cal com teor de 0%, 3%, 6%, 8% e 16% foram de 38%, 37%, 36%, 34% e 34% respectivamente. Na Figura 25 demonstra a influência da cal no LP das misturas solo-cal.

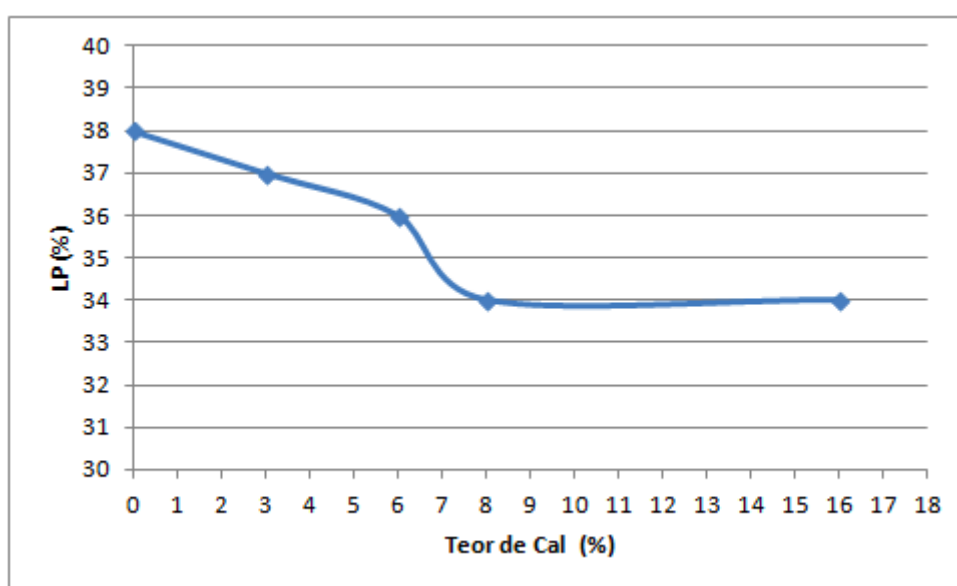


Figura 25 - Influência da Cal no LP das Misturas Solo-Cal
Fonte: Autoria própria.

Por meio do gráfico apresentado na Figura 25 observa-se que quanto maior o teor de cal utilizado na mistura solo-cal, menor foi o LP da mesma. O LP da mistura solo-cal com teor de 16% cal, por exemplo, demonstrou-se cerca de 4% menor em relação ao LP do solo natural.

4.4.3 Índice de Plasticidade

O IP é o resultado obtido pela diferença do LL e LP ($IP=LL-LP$). Na Tabela 23 apresenta-se um resumo dos ensaios de LL e LP realizados com as misturas solo-cal estudadas neste trabalho, bem como a determinação do IP das mesmas.

Tabela 23 - Resumo dos Ensaios de LL e LP, e Determinação do IP

Ensaio	Teor de Cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
LL (%)	46	46	45	45	44
LP (%)	38	37	36	34	34
IP (%)	8	9	9	11	10

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Vargas (1978), o solo natural e as misturas solo-cal ensaiadas desempenharam o comportamento de um solo com plasticidade média ($7 < IP \leq 15\%$). De acordo com Corrêa (2008), a adição da cal no solo faz com que a plasticidade do mesmo reduza, logo por meio dos resultados de IP neste trabalho não foi possível observar tal redução, pois os resultados apresentaram pequena variação.

4.5 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação (Proctor Normal) foi realizado de acordo com a NBR 7182 apenas para o solo natural. Os dados deste ensaio estão presentes na Tabela 24 a Tabela 28.

Tabela 24 - Dados Ensaio de Proctor do CP1

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 204	6,45	27,84	23,82	23,14
A 016	6,59	35,43	29,95	23,46
A 205	7,94	29,11	25,06	23,66

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 - Dados Ensaio de Proctor do CP2

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 078	7,51	32,88	27,89	24,48
A 206	7,55	36,83	30,95	25,13
A 090	11,36	34,60	29,89	25,42

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 - Dados Ensaio de Proctor do CP3

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 201	7,18	27,33	23,06	26,89
A 063	7,99	27,04	22,94	27,42
A 056	7,56	24,38	20,78	27,23

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 - Dados Ensaio de Proctor do CP4

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
E 006	7,45	23,3	19,76	28,76
A 020	7,89	32,17	26,72	28,94
A 060	7,64	25,16	21,21	29,11

Fonte: Autoria própria.

Tabela 28 - Dados Ensaio de Proctor do CP5

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A 029	7,54	29,35	24,18	31,07
2 A	7,48	24,05	20,19	30,37
A 056	7,56	27,54	22,88	30,42

Fonte: Autoria própria.

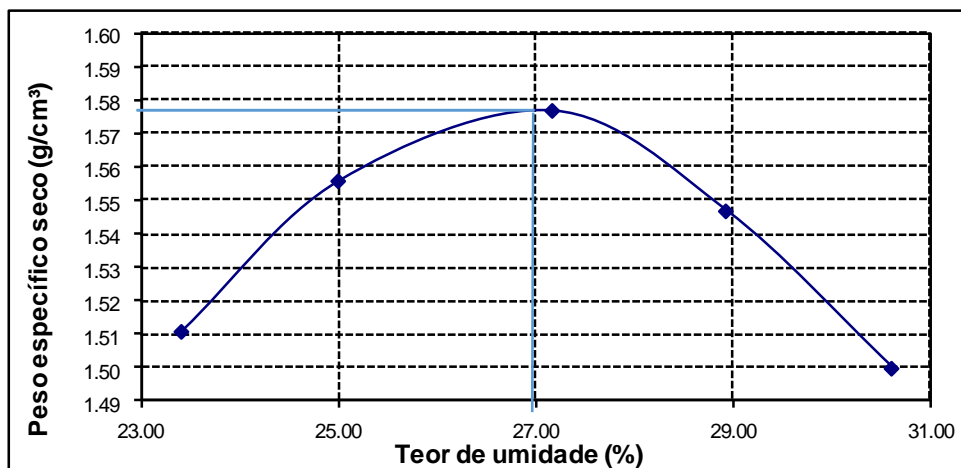
Baseando-se no volume do molde utilizado ($965,50\text{cm}^3$), nos pesos e médias das umidades dos corpos de prova, foram determinados os peso específicos aparentes (γ) e pesos específicos aparentes secos (γ_d) dos corpos de prova ensaiados conforme descrito na Tabela 29.

Tabela 29 - Dados da Determinação do Peso Específico

Determinação do Peso Específico Aparente Seco Máximo				
Identificação	Umidade (%)	Peso do CP (g)	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)
CP1	23,42	1800	1,864	1,511
CP2	25,01	1878	1,945	1,556
CP3	27,18	1936	2,005	1,577
CP4	28,94	1926	1,995	1,547
CP5	30,62	1892	1,960	1,500

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados apresentados na Tabela 29, foi traçada uma curva de compactação para o solo natural conforme apresentada na Figura 26.

**Figura 26 - Curva de Compactação do Solo Natural**

Fonte: Autoria própria.

Analisando a curva de compactação é possível afirmar que o solo natural possui peso específico aparente seco máximo de aproximadamente $1,575 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 27%. Os parâmetros encontrados neste ensaio foram próximos aos encontrados por Bordignon (2015), logo se pode afirmar que a amostra de solo utilizada pelo autor possui as mesmas propriedades que a amostra utilizada neste trabalho.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados os parâmetros encontrados por Bordignon (2015) conforme descrito no item 3.3.1.

4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Nesta caracterização mediu-se o pH das misturas utilizadas para moldar os corpos de prova. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 30.

Tabela 30 - pH dos Materiais

pH dos Materiais Utilizados para Moldar os Corpos de Prova							
Material	Água	Cal	0%	3%	6%	8%	16%
pH	10,0	12,6	7,7	11,8	12,4	12,4	12,4

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o método do pH de Eades e Grim *apud* Bordignon (2015), o pH de 12,4 é o suficiente para estabilizar um solo, ou seja, as misturas solo-cal com teor de 6%, 8% e 16% demonstraram estar com pH mínimo para a estabilização ideal.

De acordo com Little (1999), pH elevados proporcionam primeiramente o desenvolvimento de reações de troca de cátions e floculação (responsáveis pela melhoria da trabalhabilidade das misturas solo-cal) e a permanência de um valor elevado de pH beneficia as reações pozolânicas (responsáveis pelo ganho de resistência das misturas ao longo do tempo de cura).

Com base nos dados apresentados na Tabela 31, nota-se que o pH das misturas solo-cal aumentaram de acordo com o teor de cal utilizado. Embora a

mistura solo-cal com teor 3% não apresente pH suficiente, esta mistura obteve pH com um valor próximo ao ideal. Na Figura 27 apresenta-se a relação de pH por mistura solo-cal.

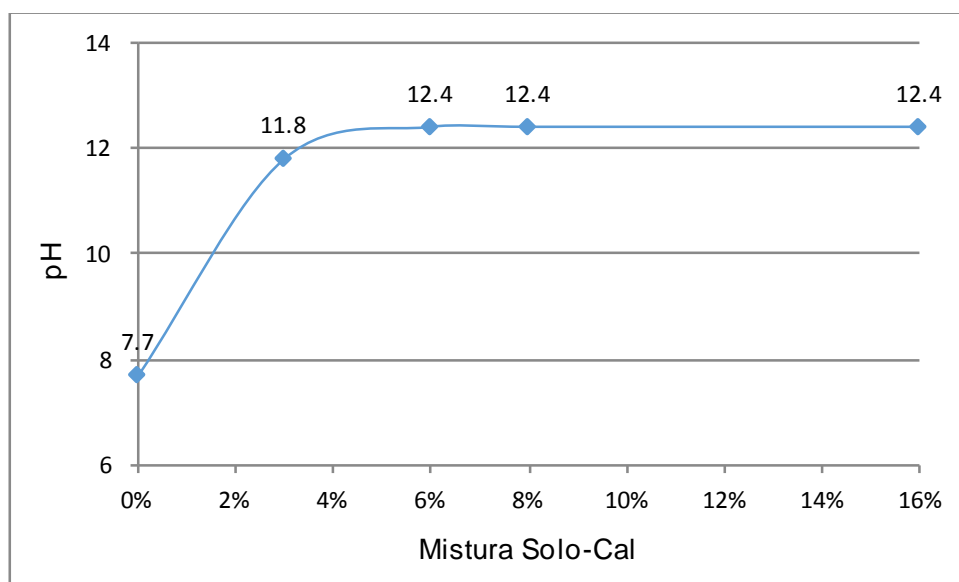


Figura 27 - pH por mistura solo-cal
Fonte: Autoria própria.

4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (q_t) dos corpos de prova estão descritos na Tabela 31. Os valores de q_t que variaram mais que 10% do valor da média foram desprezados.

Tabela 31 - Resultado de q_t dos Corpos de Prova (MPa)

Tempo de Cura	Teor de cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
0 dias	0,028	-	-	-	-
7 dias	-	0,035	0,074	0,109	0,174
14 dias	-	0,044	0,088	0,153	0,274
28 dias	-	0,046	0,113	0,181	0,468
56 dias	-	0,055	0,145	0,233	0,572

Fonte: Autoria própria.

Para a padronização dos corpos de prova, foi adotada tolerância de 1% da umidade de projeto (26,58%) e tolerância de 2% na relação do peso específico aparente seco real do corpo de prova em relação ao peso específico aparente seco de projeto (1,501g/cm³). Apenas 2 corpos de prova não estavam de acordo com as tolerâncias adotadas, como estes corpos de prova não apresentaram valores de qt discrepantes em relação aos demais da mesma mistura, eles não foram desprezados. Estas verificações estão contidas no Apêndice A.

Todos os corpos de prova com incorporação de cal apresentaram qt maior em relação ao qt dos corpos de prova com apenas solo natural. Na Tabela 32 apresentam-se as relações de qt das misturas solo-cal em relação ao qt do solo natural compactado.

Tabela 32 - Relação de qt das Misturas Solo-Cal em Relação ao Solo natural

Tempo de Cura	Teor de cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
0 dias	1,00	-	-	-	-
7 dias	-	1,25	2,64	3,89	6,21
14 dias	-	1,57	3,14	5,46	9,79
28 dias	-	1,64	4,04	6,46	16,71
56 dias	-	1,96	5,18	8,32	20,43

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova com teor de 3% cal curados em 7 dias apresentaram um ganho de qt de 25% em relação ao solo natural compactado, e com 56 dias de cura, os corpos de prova com mesmo teor de cal apresentaram aproximadamente um qt 96% maior em relação ao qt do solo natural compactado. Os corpos de prova com teor de 16% de cal foram os que apresentaram maiores ganhos de qt em relação ao qt do solo natural compactado, por meio da relação apresentada na Tabela 33 estima-se que esse ganho foi de mais de 20. Na Figura 28 demonstra-se o aumento de qt ao longo do tempo de cura.

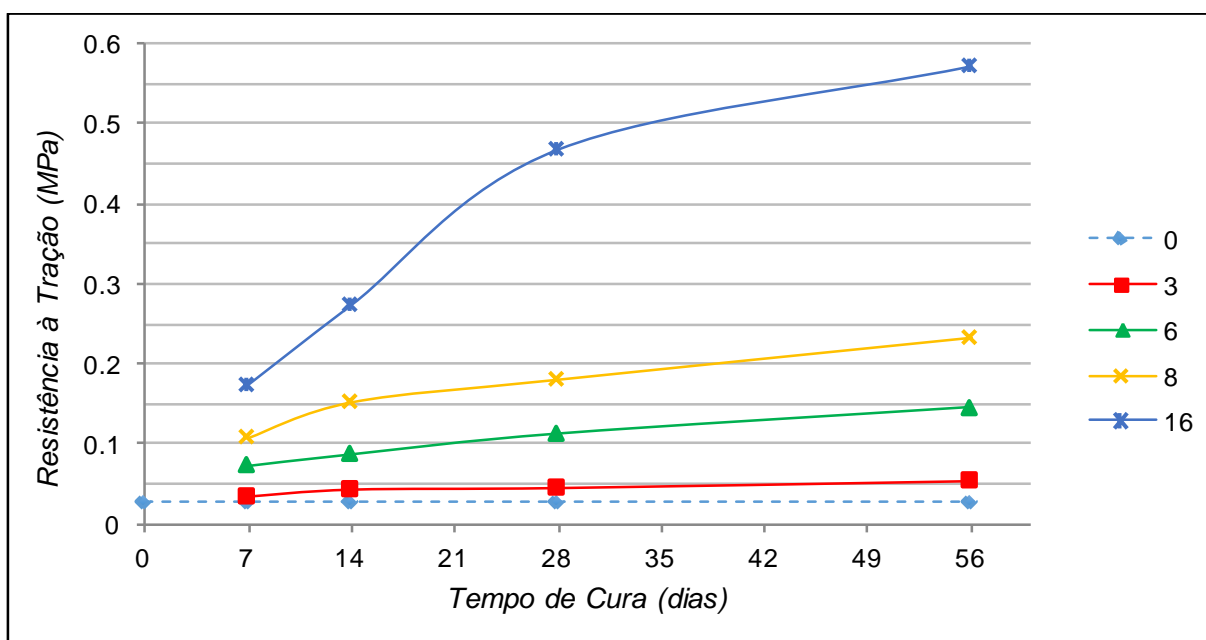


Figura 28 - Qt ao Longo do Tempo de Cura
Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 28 que quanto maior foi o teor de cal da mistura, maior foi o aumento de qt. Fato também observado pelos autores Johann *et al.* (2016), Silvani (2013) e Carvalho (1990) que relatam que com maior teor de cal e maior tempo de cura, ocorrem mais reações de troca iônica, floculação, aglomeração, reações pozolânica e carbonatação. Estas reações se dão pelo aumento de qt das misturas solo-cal.

4.8 RELAÇÃO QT/QU

Bordignon (2015) em seu trabalho obteve os seguintes resultados de resistência à compressão simples apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados de Qu das Misturas Solo-Cal (MPa)

Tempo de Cura	Teor de Cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
0 dias	0,140	-	-	-	-
7 dias	-	0,168	0,440	0,870	1,130
14 dias	-	0,185	0,525	0,988	1,613
28 dias	-	0,208	0,570	1,060	2,370
56 dias	-	0,223	0,573	1,145	2,858

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados de resistência à tração (q_t) obtidos neste trabalho, e nos resultados de resistência à compressão simples (q_u) obtidos por Bordignon (2015), determinou-se a relação (q_t/q_u) presente na Tabela 34.

Tabela 34 - Relação q_t/q_u

Tempo de Cura	Teor de cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
0 dias	0,185	-	-	-	-
7 dias	-	0,211	0,167	0,125	0,154
14 dias	-	0,236	0,168	0,155	0,170
28 dias	-	0,221	0,199	0,170	0,198
56 dias	-	0,245	0,253	0,203	0,200

Fonte: Autoria própria.

A relação q_t/q_u para as misturas estudadas neste trabalho foi de 0,192 obtida pela média das relações apresentadas na Tabela 34. Analisando as relações, é possível afirmar que a relação q_t/q_u tendeu a aumentar com o aumento do tempo de cura, e a diminuir com o aumento do teor de cal da mistura. As relações q_t/q_u para os tempos de cura de 7, 14, 28, 56 dias foram de 0,164, 0,182, 0,197 e 0,225 respectivamente, e para os teores de cal de 3%, 6%, 8% e 16% foram de 0,228, 0,197, 0,163 e 0,180 respectivamente. Valores semelhantes foram encontrados por Silvani (2013) que estudou o comportamento mecânico misturas solo-cinza volante-cal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES

A amostra do solo da Formação Guabirotuba estudada neste trabalho indicou presença de partículas de granulometria fina (silte e/ou argila) em sua composição, pois obteve uma umidade higroscópica significativa ($W_h = 5,3\%$), enquanto para solos de granulometria grossa (areias e pedregulhos) a umidade higroscópica é praticamente desprezível.

A massa (ou densidade) específica real dos grãos para o solo natural obtida foi de $G_s = 2,263 \text{ g/cm}^3$, e por meio da análise granulométrica, conclui-se que a amostra de solo ensaiada em sua composição indicou um solo siltoso de acordo com a classificação *HRB-AASHTO* (1973).

O índice de plasticidade do solo natural ($IP=8\%$) demonstra que o solo estudado possui plasticidade média. A plasticidade de um solo envolve coesão das partículas, característica das argilas, no caso da amostra de solo estudada neste trabalho, a mesma apresentou aproximadamente 31% de argila em sua composição. Além disso, o IP das misturas solo-cal estudadas não apresentaram uma variação significativa de acordo com o aumento da incorporação da cal hidratada (CH-III), deste modo não foi possível observar a influência da cal na plasticidade.

Por meio do ensaio de compactação de Proctor normal do solo natural, conclui-se que esta amostra de solo possui como parâmetros ideais de compactação uma umidade ótima de 27% e peso específico máximo aparente seco de $1,575 \text{ g/cm}^3$. Conclui-se também que a amostra de solo utilizada neste trabalho apresentou parâmetros próximos aos utilizados por Bordignon (2015), sendo deste modo viável a correlação dos resultados obtidos em ambos os trabalhos.

De acordo com a caracterização físico-química dos materiais utilizados nos corpos de prova, conclui-se que as misturas com teor de 6%, 8% e 16% apresentaram pH suficiente ($\text{pH} = 12,4$) para que ocorressem as reações para a estabilização do solo, desta maneira os corpos de prova com 6% de cal seriam mais viável do ponto de vista econômico. Mas mesmo assim, os corpos de prova com 3% de cal apresentaram aumento de q_t significativo.

A incorporação da cal hidratada em pó (CH-III) em um solo oriundo da Formação Guabirotuba mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável, uma vez que gerou um aumento significativo de resistência à tração por compressão diametral (q_t) de todas as amostras de solo estabilizado com cal em relação ao solo natural compactado.

As misturas solo-cal com teor de 3% de cal curadas em 7 dias apresentaram um ganho de 25% em relação aos corpos de prova com apenas solo natural compactado. O aumento de q_t chegou a ser mais de 20 vezes maior que o q_t dos corpos de prova com apenas solo natural compactado para as misturas solo-cal com teor de 16% de cal curados em 56 dias. O valor de q_t das misturas solo-cal curadas em 56 dias foi praticamente o dobro do valor das misturas solo-cal curadas em 7 dias.

Evidenciou-se que quanto maior o teor de cal, maior o q_t para um determinado peso específico aparente seco. Além disso, uma curva pode ser observada nos resultados de q_t versus tempo de cura para um determinado teor de cal, a qual pode ser utilizada para estimar o valor de q_t para outros tempos de cura entre 7 e 56 dias.

Baseando-se nos resultados de q_t obtidos neste trabalho e de resistência à compressão simples (q_u) obtidos no trabalho de Bordignon (2015), conclui-se que a relação geral q_t/q_u das misturas solo-cal estudadas neste trabalho foi de 0,192 com um erro de 0,008. Por meio desta relação, é possível realizar apenas um ensaio (q_t ou q_u) e estimar o valor do outro, evitando assim o desperdício de material, tempo e dinheiro.

Sendo assim, a possibilidade de utilizar o solo "*in situ*" da Formação Guabirotuba estabilizado com cal evita o traslado de material, representando uma significativa redução de custos e de impactos ambientais, como por exemplo na aplicação de solo-cal no reforço de base e sub-base em obras de pavimentação. No

caso do município de Curitiba/PR, além do uso de solo-cal como uma solução de problemas técnicos de engenharia, o solo-cal proporciona também um incremento socioeconômico na região, pois na mesma estão localizadas diversas indústrias produtoras de cal.

5.2 SUGESTÕES

Esta pesquisa abordou alguns parâmetros que determinam o comportamento mecânico de misturas solo-cal, tais como teor de cal, tempo de cura, teor de umidade e peso específico aparente seco máximo. Outros parâmetros poderiam ser analisados, como por exemplo: temperatura durante o tempo de cura dos corpos de prova, influência da porosidade, influência de outros tipos de cal, resistência ao cisalhamento, etc.

Os teores de cal estudados neste trabalho mostraram-se eficientes no ganho de resistência, porém pode ser estudado teores de cal superiores a 16% para se obter qual teor de cal resulta na maior resistência destes materiais. Além disso, com o intuito de se analisar as reações que ocorrem durante o processo de estabilização química do solo, pode-se realizar estudos estequiométricos.

Outra possível vertente seria estudar as misturas solo-cal abordadas nesta pesquisa com tempos de cura maiores, para assim aferir qual seria o tempo que determinado teor de cal levaria para estabilizar por completo.

A amostra estudada neste trabalho indicou um solo arenoso, e de acordo com a literatura a estabilização química com a cal é mais eficaz em solos argilosos. Deste modo seria interessante estudar o comportamento mecânico desta estabilização em um solo da Formação Guabirota que seja argiloso.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO- M-145. 1973.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453: Cal Virgem para Construção Civil - Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ. 2003. 3p.

_____. **NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**, Rio de Janeiro, RJ. 1986. 9p.

_____. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**, Rio de Janeiro, RJ. 1984. 6p.

_____. **NBR 6473: Cal Virgem e Cal Hidratada - Análise Química**, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 31p.

_____. **NBR 6502: Rochas e Solos - Comitê Brasileiro de Construção Civil. S.I.** Rio de Janeiro, RJ. 1995. 18p.

_____. **NBR 6508: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica**, Rio de Janeiro, RJ. 1984. 8p.

_____. **NBR 7175: Cal Hidratada para Argamassas - Requisitos**, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 4p.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**, Rio de Janeiro, RJ. 1988. 3p.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**, Rio de Janeiro, RJ. 1988. 13p.

_____. **NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação**, Rio de Janeiro, RJ. 1986. 10p.

_____. **NBR 7222: Argamassa e Concreto Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos**, Rio de Janeiro, 1994. 8p.

ABPC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. São Paulo, SP. 2008. Acessado em 27 de maio de 2016. Disponível em: <www.abpc.org.br/frame.htm>

ARAÚJO, A. F., BARROSO, S. H. A.; RABÊLO, A. N.; VASCONCELOS, M. A. G. **O Uso da Técnica de Solo-cal para Melhoramento das Propriedades Tecnológicas de um Solo da Região do Baixo Jaguaribe no Estado do Ceará.** Artigo, Cobramseg. Búzios, RJ. 2008.

BORDIGNON, V. R. **Efeitos da Adição da Cal Hidratada na Estabilização de um Solo Sedimentar para Pavimentação Urbana na Região de Curitiba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, PR, 2015.

BUENO, E. S. **Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2011.

CARVALHAIS, R. **Pedologia - Estudo dos Solos.** Notas de aula. Colégio Lourdinias. Governador Valadares, MG.

CARVALHO, J. B. Q. **Reações que Ocorrem Quando da Estabilização com Cal de Solos Lateríticos.** In: 24a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Anais, Belém, ABPV, 1990. p. 224-231.

CONSOLI, N. C.; JOHANN, A. D. R.; GAUER, E. A.; SANTOS, V. R. D.; MORETTO, R. L.; CORTE, M. B. **Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures.** Géotechnique Letters 2, 81–85, 2012.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização Química e Solidificação do Resíduo Oleoso Gerado nas Atividades de E & P de Petróleo, com Solo para o Uso em Camadas de Bases e/ou Sub-bases de Pavimentos Rodoviários.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2007. 136 p.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das Melhorias das Propriedades Físicas e Mecânicas de Solos Originados de Rochas Sedimentares pela Adição de Cal para Fins de Pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2008. 151p.

CUNHA, G. H. R. I. **Estudo de Compressibilidade de um Solo da Formação Guabirotuba Estabilizado com Cal.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2016. 62 p.

JOHANN, A. D. R.; PASSAIA, O. A.; MASUERO, G. B.; CONSOLI, N. C. **Análise da Aplicação da Relação de Vazios/Cal na Estimativa da Resistência à Tração de um Solo Silteso Estabilizado com Cal**. COBRAMSEG 2016 – Congresso Brasileiro Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2016.

JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Silteso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 6ª ed. norte-americana, Ed. Thomson Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2007. 562p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Definição e Notação de Horizontes e Camadas do Solo, por Humberto Gonçalves dos Santos e outros. 19 ed. Rio de Janeiro, RJ. 1983. 34 p.

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 306 p.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. 1ª Edição. Curitiba. MINEROPAR, 2011. 49p.

FREITAS JUNIOR, J. A. **Materiais de Construção Civil - Aglomerantes**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2013. Acesso em 26 de junho de 2016. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/6/6b/TC030_Aglomerantes_x.pdf>

GUÉRIOS, E. M. **Estudo do Melhoramento de Solo com Adição de Cal Hidratada para Uso em Pavimento Urbano**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2013. 70p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. – Ed. Pini. São Paulo, SP. 2002. 341 p.

_____. **Estabilização de Solos - Nova e Importante Aplicação da Cal Seus Conceitos e Suas Vantagens**. São Paulo, 1971.

GRECO, J. A. S. **Materiais para pavimentação. Solos – Conceitos e Ensaio de Mecânica dos Solos- Classificação dos Solos para Fins Rodoviários.** Universidade Federal de Minas Gerais. 2007. Acesso em 30 de maio de 2016. Disponível em: <<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/notas%20de%20aula%20solos.pdf>>.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction: a Comprehensive Guide.** Intermediate Technology Publicate, 1994.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization. Principles and Practice.** Sydney – Melbourne - Brisbane, Halsted Press, New York, USA. 1972. 374 p.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: Estudos de Campo e Laboratório.** Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, 2002.

_____. **Ensaio de Compactação e Caracterização.** Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, PR, 1997.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates.** Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association. 1999.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação.** Notas de Aula, Capítulo 4. UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, MG. 2009. 204 p.

MINASCAL **Cal Hidratada.** 2012. Acessado em: 20 de Maio de 2016. Disponível em: <www.minascal.com.br>

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP, 1998. 587 p.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia Aplicada,** Piracicaba, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, J. C. **Caracterização Geotécnica de Materiais Inconsolidados Arenosos do Distrito Federal Utilizados como Material de Construção.** Dissertação de Mestrado. Unb - Universidade de Brasília, DF, 2000.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis.** 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Copiarte. 2002. 269 p.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de Curauá e Sisal Como Reforço em Matrizes de Solo.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia – PUC. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

POMATTI, K. E. **Estabilização do Solo da Região de São Pedro de Alcântara - SC com Cal Visando seu Emprego na Pavimentação.** Florianópolis, 2000. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS. M.; LIMA. D.; BUENO, B. **Estabilização dos Solos com Cal e Betume.** In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos, SP. Abril, 1995. 74-97 p.

SILVANI, C. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-cinza volante-cal.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos Três solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

TERZAGHI, K; PECK, R. B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia.** Traduzido por Antônio José da Costa Nunes e Maria de Lurdes Campo Campelo. Rio de Janeiro: SEDEGRA, 1962. 659p.

USDI - U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION. **Earth Manual.** 3ed., Denver, Colorado, 1998.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** Ed. McGraw - Hill do Brasil LTDA, São Paulo, SP, 1978. 509p.

VAZ, L. F. **Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais.** Solos e Rochas. São Paulo. 1996.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ. Brazil. 2010.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO
DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tabela A1 - Identificação das Misturas

Tempo de Cura	Teor de cal				
	0%	3%	6%	8%	16%
0 dias	A	-	-	-	-
7 dias	-	B	C	D	E
14 dias	-	F	G	H	I
28 dias	-	J	K	L	M
56 dias	-	N	O	P	Q

Fonte: Autoria própria.

Tabela A2 - Verificação da Umidade da Mistura A

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
31H	7,25	17,38	15,27	26,309
20H	6,82	17,33	15,12	26,627
26H	7,54	17,90	15,71	26,805
Umidade Média				26,580

Fonte: Autoria própria.

Tabela A3 - Verificação da Umidade da Mistura B

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
17H	7,93	17,96	15,84	26,802
18H	7,01	17,18	15,6	26,335
27H	7,41	17,66	15,52	26,387
Umidade Média				26,508

Fonte: Autoria própria.

Tabela A4 - Verificação da Umidade da Mistura C

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A76	6,81	17,02	14,88	26,518
J1	7,90	18,10	15,97	26,394
22Y	7,91	18,07	15,96	26,211
Umidade Média				26,374

Fonte: Autoria própria.

Tabela A5 - Verificação da Umidade da Mistura D

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A37	7,75	17,83	15,67	27,273
A202	7,66	18,1	15,79	27,306
4	7,43	17,69	15,47	27,612
Umidade Média				27,397

Fonte: Autoria própria.

Tabela A6 - Verificação da Umidade da Mistura E

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A28	6,78	16,79	14,69	26,549
3A	7,50	17,72	15,58	26,485
A66	7,41	17,75	15,66	25,333
Umidade Média				26,122

Fonte: Autoria própria.

Tabela A7 - Verificação da Umidade da Mistura F

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A98	7,57	17,62	15,51	26,574
A31	6,61	16,64	14,55	26,322
L1	6,86	16,90	14,79	26,608
Umidade Média				26,502

Fonte: Autoria própria.

Tabela A8 - Verificação da Umidade da Mistura G

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A93	5,86	16,46	14,20	27,098
A41	7,66	17,92	15,70	27,612
A65	7,86	18,01	15,87	26,717
Umidade Média				27,142

Fonte: Autoria própria.

Tabela A9 - Verificação da Umidade da Mistura H

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A97	7,28	17,37	15,23	26,918
A45	6,21	16,56	14,37	26,838
A25	7,65	17,69	15,58	26,608
Umidade Média				26,788

Fonte: Autoria própria.

Tabela A10 - Verificação da Umidade da Mistura I

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A202	7,66	18,02	15,84	26,650
18H	7,01	17,08	14,90	27,630
27H	7,41	17,78	15,52	27,867
Umidade Média				27,382

Fonte: Autoria própria.

Tabela A11 - Verificação da Umidade da Mistura J

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A8	07,06	17,11	15,06	25,625
A26	7,66	17,70	15,57	26,928
A76	6,81	16,99	14,84	26,775
Umidade Média				26,443

Fonte: Autoria própria.

Tabela A12 - Verificação da Umidade da Mistura K

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A37	7,75	17,98	15,84	26,452
3A	7,50	17,40	15,30	26,923
A76	7,55	18,13	15,91	26,555
Umidade Média				26,644

Fonte: Autoria própria.

Tabela A13 - Verificação da Umidade da Mistura L

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A53	6,88	17,31	15,10	26,886
A89	7,29	17,62	15,39	27,531
A3	7,28	18,09	15,80	26,878
Umidade Média				27,098

Fonte: Autoria própria.

Tabela A14 - Verificação da Umidade da Mistura M

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
J1	7,90	18,04	15,94	26,119
J2	7,86	17,93	15,81	26,667
A94	7,53	18,11	15,86	27,011
Umidade Média				26,599

Fonte: Autoria própria.

Tabela A15 - Verificação da Umidade da Mistura N

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
22Y	7,91	17,96	15,88	26,098
25H	8,26	18,40	16,33	25,651
17H	7,93	18,03	15,94	26,092
Umidade Média				25,947

Fonte: Autoria própria.

Tabela A16 - Verificação da Umidade da Mistura O

Cápsula				Umidade (%)
Identificação	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
23H	6,85	17,16	15,00	26,503
4	7,43	17,05	14,96	27,756
16H	07,04	17,32	15,08	27,861
Umidade Média				27,373

Fonte: Autoria própria.

Tabela A17 - Verificação da Umidade da Mistura P

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A24	7,76	17,99	15,89	25,830
A66	7,41	17,78	15,64	26,002
A28	6,78	17,01	14,68	29,494
Umidade Média				27,109

Fonte: Autoria própria.

Tabela A18 - Verificação da Umidade da Mistura Q

Identificação	Cápsula			Umidade (%)
	Vazia (g)	Solo Úmido (g)	Solo Seco (g)	
A58	7,62	17,70	15,62	26,000
A36	6,71	16,74	14,65	26,322
A87	6,80	16,81	14,73	26,230
Umidade Média				26,184

Fonte: Autoria própria.

Tabela A19 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura A

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
A1	374,14	100,00	50,00	26,580	1,501	1,905	1,505	1,003	210,87	0,027	0,027
A2	372,29	100,50	50,00	26,580	1,501	1,887	1,490	0,993	190,79	0,024	0,024
A3	374,83	101,00	50,00	26,580	1,501	1,890	1,493	0,995	211,12	0,027	0,027
A4	372,17	99,50	50,00	26,580	1,501	1,905	1,505	1,003	200,83	0,026	0,026
Média											0,026

Fonte: Autoria própria.

Tabela A20 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura B

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
B1	371,06	99,00	50,00	26,508	1,501	1,910	1,520	1,013	254,79	0,033	0,033
B2	375,67	99,50	50,00	26,508	1,501	1,920	1,530	1,019	301,43	0,039	0,039
B3	374,52	100,00	50,00	26,508	1,501	1,910	1,510	1,006	271,12	0,035	0,035
B4	374,40	100,50	50,00	26,508	1,501	1,900	1,510	1,006	281,17	0,036	0,036
Média											0,035

Fonte: Autoria própria.

Tabela A21 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura C

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
C1	372,76	101,00	50,00	26,374	1,501	1,880	1,490	0,993	582,41	0,073	0,073
C2	372,82	99,50	50,00	26,374	1,501	1,910	1,520	1,013	622,58	0,080	0,080
C3	373,03	102,00	50,00	26,374	1,501	1,860	1,480	0,986	411,71	0,051	X
C4	375,32	102,00	50,00	26,374	1,501	1,870	1,490	0,993	542,25	0,068	0,068
										Média	0,074

Fonte: Autoria própria.

Tabela A22 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura D

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
D1	373,47	101,00	50,00	27,397	1,501	1,880	1,500	0,999	843,5	0,106	0,106
D2	373,54	100,00	50,00	27,397	1,501	1,900	1,510	1,006	833,46	0,106	0,106
D3	373,30	100,50	50,00	27,397	1,501	1,890	1,500	0,999	893,70	0,113	0,113
D4	374,97	99,50	50,00	27,397	1,501	1,920	1,520	1,013	1014,2	0,130	X
										Média	0,109

Fonte: Autoria própria.

Tabela A23 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura E

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
E1	373,44	102,00	50,00	26,122	1,501	1,860	1,480	0,986	1415,87	0,177	0,177
E2	373,24	100,00	50,00	26,122	1,501	1,900	1,510	1,006	1405,83	0,179	0,179
E3	373,87	101,50	50,00	26,122	1,501	1,880	1,490	0,993	1325,49	0,166	0,166
E4	373,48	101,50	50,00	26,122	1,501	1,870	1,490	0,993	1174,87	0,147	X
										Média	0,174

Fonte: Autoria própria.

Tabela A24 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura F

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
F1	373,05	98,50	50,00	26,502	1,501	1,930	1,530	1,019	371,54	0,048	0,048
F2	372,69	100,00	50,00	26,502	1,501	1,900	1,510	1,006	251,04	0,032	X
F3	375,17	100,50	50,00	26,502	1,501	1,900	1,510	1,006	371,54	0,047	0,047
F4	373,87	99,50	50,00	26,502	1,501	1,910	1,520	1,013	281,17	0,036	0,036
										Média	0,044

Fonte: Autoria própria.

Tabela A25 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura G

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
G1	374,46	101,50	50,00	27,142	1,501	1,880	1,490	0,993	642,66	0,081	0,081
G2	373,40	100,00	50,00	27,142	1,501	1,900	1,510	1,006	723	0,092	0,092
G3	374,50	101,00	50,00	27,142	1,501	1,890	1,500	0,999	702,91	0,089	0,089
G4	374,95	101,50	50,00	27,142	1,501	1,880	1,490	0,993	723	0,091	0,091
										Média	0,088

Fonte: Autoria própria.

Tabela A26 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura H

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
H1	375,11	101,00	50,00	26,788	1,501	1,890	1,500	0,999	984,08	0,124	X
H2	373,07	101,50	50,00	26,788	1,501	1,870	1,490	0,993	1205	0,151	0,151
H3	375,19	101,00	50,00	26,788	1,501	1,890	1,500	0,999	1194,95	0,151	0,151
H4	373,13	99,00	50,00	26,788	1,501	1,920	1,520	1,013	1215,04	0,156	0,156
										Média	0,153

Fonte: Autoria própria.

Tabela A27 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura I

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
I1	372,68	99,50	50,00	27,382	1,501	1,910	1,510	1,006	2168,99	0,278	0,278
I2	375,98	100,50	50,00	27,382	1,501	1,910	1,510	1,006	2168,99	0,275	0,275
I3	374,62	101,00	50,00	27,382	1,501	1,890	1,500	0,999	1867,74	0,235	X
I4	372,16	99,50	50,00	27,382	1,501	1,900	1,510	1,006	2108,74	0,270	0,270
Média											0,274

Fonte: Autoria própria.

Tabela A28 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura J

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
J1	373,50	99,00	50,00	26,443	1,501	1,920	1,530	1,019	361,5	0,046	0,046
J2	374,07	99,00	50,00	26,443	1,501	1,920	1,530	1,019	502,08	0,065	X
J3	374,25	101,00	50,00	26,443	1,501	1,890	1,500	0,999	361,5	0,046	0,046
J4	374,53	99,50	50,00	26,443	1,501	1,920	1,520	1,013	451,87	0,058	X
Média											0,046

Fonte: Autoria própria.

Tabela A29 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura K

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
K1	373,20	98,50	50,00	26,644	1,501	1,930	1,530	1,019	964	0,125	0,125
K2	374,04	100,50	50,00	26,644	1,501	1,900	1,500	0,999	773,21	0,098	0,098
K3	374,41	99,00	50,00	26,644	1,501	1,930	1,530	1,019	913,79	0,118	0,118
K4	374,27	99,50	50,00	26,644	1,501	1,920	1,520	1,013	592,46	0,076	X
Média											0,113

Fonte: Autoria própria.

Tabela A30 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura L

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
L1	377,32	100,00	50,00	27,098	1,501	1,920	1,530	1,019	1435,95	0,183	0,183
L2	373,06	100,50	50,00	27,098	1,501	1,890	1,500	0,999	1397,23	0,177	0,177
L3	373,78	100,00	50,00	27,098	1,501	1,900	1,510	1,006	1387,57	0,177	0,177
L4	372,98	99,50	50,00	27,098	1,501	1,910	1,520	1,013	1456,77	0,186	0,186
										Média	0,181

Fonte: Autoria própria.

Tabela A31 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura M

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
M1	372,88	99,50	50,00	26,599	1,501	1,910	1,520	1,013	3655,15	0,468	0,468
M2	372,04	99,50	50,00	26,599	1,501	1,900	1,510	1,006	2932,16	0,375	X
M3	370,51	100,50	50,00	26,599	1,501	1,880	1,490	0,993	2902,03	0,368	X
M4	373,89	100,00	50,00	26,599	1,501	1,900	1,510	1,006	3685,28	0,469	0,469
										Média	0,468

Fonte: Autoria própria.

Tabela A32 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura N

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
N1	372,55	99,00	50,00	25,947	1,501	1,920	1,520	1,013	451,87	0,058	0,058
N2	373,74	101,50	50,00	25,947	1,501	1,880	1,490	0,993	431,87	0,054	0,054
N3	373,12	102,00	50,00	25,947	1,501	1,860	1,480	0,986	411,29	0,051	0,051
N4	373,45	99,50	50,00	25,947	1,501	1,910	1,520	1,013	612,54	0,078	X
										Média	0,055

Fonte: Autoria própria.

Tabela A33 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura O

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
O1	373,54	101,00	50,00	27,373	1,501	1,880	1,500	0,999	893,7	0,113	X
O2	372,77	99,00	50,00	27,373	1,501	1,920	1,520	1,013	1245,16	0,160	X
O3	373,26	102,00	50,00	27,373	1,501	1,860	1,480	0,986	1184,91	0,148	0,148
O4	372,81	100,00	50,00	27,373	1,501	1,900	1,510	1,006	1114,62	0,142	0,142
										Média	0,145

Fonte: Autoria própria.

Tabela A34 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura P

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
P1	372,98	101,00	50,00	27,109	1,501	1,880	1,490	0,993	1676,95	0,211	0,211
P2	370,36	101,00	50,00	27,109	1,501	1,870	1,480	0,986	1968,16	0,248	0,248
P3	372,43	100,00	50,00	27,109	1,501	1,900	1,510	1,006	1767,33	0,225	0,225
P4	373,54	100,00	50,00	27,109	1,501	1,900	1,510	1,006	1938,03	0,247	0,247
										Média	0,233

Fonte: Autoria própria.

Tabela A35 - Verificação do Peso Específico Aparente e Cálculo de qt da Mistura Q

CP	Peso (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	W real (%)	yd proj (g/cm ³)	yn (g/cm ³)	yd real (g/cm ³)	yd real/ yd proj	Carga (N)	qt (MPa)	Controle
Q1	373,33	99,50	50,00	26,184	1,501	1,910	1,520	1,013	4659,32	0,596	0,596
Q2	371,81	101,50	50,00	26,184	1,501	1,870	1,480	0,986	4116,65	0,516	0,516
Q3	374,24	100,00	50,00	26,184	1,501	1,910	1,510	1,006	3614,63	0,460	X
Q4	375,65	101,50	50,00	26,184	1,501	1,880	1,500	0,999	4799,9	0,602	0,602
										Média	0,572

Fonte: Autoria própria.