

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

GUYLHERME HENRIQUE RODRIGUES ITIBERÊ DA CUNHA

**ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO DA FORMAÇÃO
GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

GUYLHERME HENRIQUE RODRIGUES ITIBERÊ DA CUNHA

**ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO DA FORMAÇÃO
GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação do curso superior de Engenharia de Produção Civil do Departamento de Construção Civil –DACOC– da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR– como requisito para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. D.Sc. Ronaldo Luis S.Izzo

Co-Orientadora: Prof. D.Sc. Amanda D. R. Johann

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA ESTABILIZADO COM CAL

Por

Gyulherme Henrique Rodrigues Itiberê da Cunha

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, defendido e aprovado em 24 de junho de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Ronaldo Luis Dos Santos Izzo, Dr.
Orientador
UTFPR

Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
Co-orientadora
UTFPR

Rogério Francisco Küster Puppi, Dr.
UTFPR

RESUMO

DA CUNHA, Guilherme Henrique Rodrigues Itiberê. **Estudo de Compressibilidade de um Solo da Formação Guabirota Estabilizado com Cal**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O solo é um dos principais materiais para a construção civil, sendo o material de base das edificações e estruturas de grande porte, como pontes, aeroportos, túneis, hidroelétricas, estradas, dentre outras obras. No entanto, nem sempre o solo presente no local apresenta as características adequadas para a sua utilização. O conhecimento das potencialidades dos materiais encontrados na região, ou mesmo as limitações destes materiais na natureza é uma forma de identificar o comportamento do material a ser utilizado, além de possibilitar, por meio dessas investigações e pesquisas científicas, a apresentação de soluções mais viáveis economicamente para a utilização das camadas dos solos. Uma das alternativas para solucionar os problemas relacionados à baixa qualidade do solo é o melhoramento do solo, existente no local da obra, com o aglomerante cal, denominado tecnicamente como mistura solo-cal. Desta forma, este trabalho objetiva avaliar o efeito da adição de cal calcítica hidratada CH-III, nos teores de 3%, 6%, 8% e 16%, em amostras de solo da Formação Guabirota, que abrange a região de Curitiba, para verificar o comportamento do material utilizado com relação ao processo de adensamento unidimensional, através do ensaio de compressão edométrica. Neste trabalho verificou-se 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, e constatou-se, também, que em longo prazo o solo contendo 16% de cal pode oferecer resultados satisfatórios com relação ao deslocamento vertical ocorrido devido à aplicação de tensões normais ao solo quando comparado com solo sem adição de cal.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura solo-cal, Formação Guabirota, Tensões Normais, Recalque, Compressão Edométrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização da bacia sedimentar de Curitiba.....	15
Figura 2.2 – Mecanismo de troca de cátions.....	24
Figura 2.3 – Mecanismo de estabilização solo-cal.....	23
Figura 2.4 – (a) Determinação gráfica do parâmetro C_c (b) determinação gráfica do parâmetro C_R	29
Figura 2.5 – Representação gráfica do solo pré-adensado com $\sigma'_{vf} > \sigma'_{vm}$	30
Figura 2.6 – Representação gráfica do solo pré-adensado com $\sigma'_{vf} < \sigma'_{vm}$	31
Figura 2.7 – Representação gráfica do solo normalmente adensado.....	31
Figura 3.1 – Agitador de peneiras utilizado no ensaio de peneiramento do solo.	35
Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo natural; ensaio de granulometria conjunta.....	36
Figura 3.3 – Esquema simplificado dos limites de consistência do solo.....	36
Figura 3.4 – Detalhe do ensaio para determinação da massa específica.....	37
Figura 3.5 – Representação do dispositivo utilizado no ensaio edométrico.....	40
Figura 3.6 – Amostras utilizadas para a realização do ensaio com suas respectivas adições.....	41
Figura 3.7 – Verificação da quantidade de material necessária para efetuar o ensaio.....	43
Figura 3.8– Dispositivo contendo a célula de adensamento com a amostra compactada.....	44
Figura 3.9– Prensa de adensamento utilizada para o desenvolvimento do ensaio proposto.....	45
Figura 3.10– Representação dos pesos utilizados e a sequência de aplicação.....	45
Figura 3.11.– Prensa de adensamento integrada ao equipamento de obtenção de dados.....	46
Figura 4.1 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o primeiro carregamento (Pressão de 49,95 kPa).....	47
Figura 4.2 – Comparação dos deslocamentos verticais entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o segundo carregamento (Pressão de 99,90 kPa).....	48
Figura 4.3 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o terceiro carregamento (Pressão de 199,80 kPa).....	49

Figura 4.4 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o quarto carregamento (Pressão de 399,60 kPa).....	50
Figura 4.5 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o quinto carregamento (Pressão de 799,20 kPa).....	51
Figura 4.6 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o sexto carregamento (Pressão de 1598,4 kPa).....	52
Figura 4.7 – Gráfico utilizado para obtenção do t_{90}	54
Figura 4.8 - Comparação entre os índices de vazios das amostras estudadas em função do logaritmo da pressão aplicada nas amostras.....	57
Figura 4.9 – Valores adimensionais de deformabilidade em função da tensão normal efetiva.....	58
Figura 4.10 – Curva de compressão oedométrica para o solo natural de Bauru; Curva de compressão oedométrica dos solos da região de Bauru misturados com cal	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados da análise dos ensaios de compactação.....	38
Tabela 3.2 – Valores da densidade aparente real dos grãos das misturas.....	39
Tabela 3.3 – Resultado do ensaio de ph para as misturas definidas.....	42
Tabela 3.4 – Cálculo da quantidade de material para moldar cada corpo de prova..	42
Tabela 3.5 – Valores da quantidade de material separado para o ensaio.....	43
Tabela 3.6 – Quantidade de material utilizado no ensaio.....	44
Tabela 4.1 – Valores dos deslocamentos verticais das misturas de solo em cada etapa de carregamento.....	53
Tabela 4.2 – Coeficiente de adensamento Cv. 90 para cada amostra de solo.....	55
Tabela 4.3 – Índice de vazios das misturas para cada tensão aplicada.....	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	12
1.3	JUSTIFICATIVA.....	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SOLOS	13
2.2	TIPOS DE SOLOS.....	13
2.2.1	Solos Residuais.....	14
2.2.2	Solos Transportados.....	14
2.2.3	Solos Pedogênicos	14
2.3	FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....	15
2.4	CONCEITOS SOBRE A ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	16
2.4.1	Tipos de Estabilização	16
2.5	SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS.....	17
2.6	IMPORTÂNCIA DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO.....	18
2.6.1	A Importância da Estabilização do Solo para Fundações.....	18
2.6.2	A Importância da Estabilização do Solo para Pavimentação.....	18
2.7	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL	19
2.7.1	A Cal.....	20
2.7.2	Reações Solo-Cal.....	21
2.7.2.1	Troca catiônica	21
2.7.2.2	Floculação	22
2.7.2.3	Reações pozolânicas.....	22
2.7.2.4	Carbonatação	23
2.8	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL	24
2.8.1	Efeito da Relação Vazios/Cal	24
2.8.2	Característica de Compactação	25
2.8.3	Resistência à Compressão Simples	25
2.8.4	Adensamento de Solos.....	26
2.8.4.1	Cálculo de recalques pela compressibilidade edométrica	27
2.8.4.2	Teoria de adensamento unidimensional de Terzaghi	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	33

3.1	MATERIAIS	33
3.1.1	Solo	33
3.1.2	Propriedades do Solo Estudado	34
3.1.2.1	Análise granulométrica do solo estudado	34
3.1.2.2	Limites de Atterberg do solo estudado	36
3.1.2.3	Massa específica real dos grãos do solo estudado	37
3.1.2.4	Compactação do solo estudado	38
3.1.3	A Cal.....	38
3.1.4	Água	39
3.2	MÉTODOS	39
3.2.1	Massa Específica Real dos Grãos dos Solos Contendo Cal	39
3.2.2	Ensaio de Compressão Oedométrica	40
3.2.3	Desenvolvimento dos Ensaios.....	40
3.2.2.1	Determinação da dosagem da mistura solo-cal.....	40
3.2.2.2	Equipamentos utilizados e desenvolvimento do ensaio oedométrico ..	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	RECALQUES OCORRIDOS NAS AMOSTRAS	47
4.1.1	Análise dos ensaios de adensamento para o primeiro carregamento .	47
4.1.2	Análise dos ensaios de adensamento para o segundo carregamento	48
4.1.3	Análise dos ensaios de adensamento para o terceiro carregamento ..	49
4.1.4	Análise dos ensaios de adensamento para o quarto carregamento	50
4.1.5	Análise dos ensaios de adensamento para o quinto carregamento	51
4.1.6	Análise dos ensaios de adensamento para o sexto carregamento	51
4.1.7	Análise geral dos resultados adensamento	52
4.2	COEFICIENTES DE ADENSAMENTO.....	53
4.3	ANÁLISE DO ÍNDICE DE VAZIOS.....	55
	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

INTRODUÇÃO

A realização de obras e empreendimentos da construção civil utilizando preferencialmente os materiais disponíveis nos locais onde estão sendo desenvolvidas tais atividades tem sido considerada mais viável economicamente, mais racional e mais sustentável, pois além de manter e aproveitar o material disponível no local, também se evita gastos com transporte, com serviços para adequação do ambiente, com mão de obra ociosa, dentre outros.

No caso dos solos, é necessário realizar inúmeras análises prévias para identificar as propriedades do material antes de utilizá-lo, para verificar se o material apresenta características adequadas para o determinado uso.

A engenharia geotécnica vem aprimorando estudos objetivando solucionar problemas envolvendo desperdício de material, de tempo e de dinheiro. Em certos casos, para evitar a troca do material presente no local de realização da obra, torna-se necessário realizar melhorias do material disponível, como é o caso da estabilização do solo.

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, do que o 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 e GUILLAUD, 1994).

A técnica de tratamento de solos com cal pode ser verificada em construção de bases para pavimentos, na proteção de taludes em barragens de terra, e como camada de suporte para fundações superficiais (BUENO, 2011).

Estudos referentes à resistência a compressão de solos estabilizados com cal já vem sendo desenvolvidos durante muitos anos, no entanto, devido à importância da análise do comportamento relativo à compressibilidade e ao adensamento dos solos estabilizados com cal, para se minimizar o recalque de bases que servem de suporte para uma determinada obra, optou-se por realizar este trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da mistura de cal a um solo da Formação Guabirotuba na curva de adensamento, e verificar a variação do coeficiente de adensamento CV.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Avaliar a variação do coeficiente de adensamento CV com a adição de cal ao solo;
- Verificar a variação do índice de vazios com a adição de cal ao solo;
- Comparar o recalque total das amostras estabilizadas com diferentes teores de cal com a amostra sem adição de cal.

1.3 JUSTIFICATIVA

O solo, na maioria dos casos, é usado como matéria prima para a base das estruturas de grande porte, como pontes, aeroportos, túneis, hidroelétricas, estradas, etc. No entanto o solo presente em diversas regiões brasileiras não possui as características adequadas para a sua utilização como base no desenvolvimento de determinadas obras.

Dependendo da obra que será executada na região é 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.

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 para a execução dessas camadas.

Desta forma, existe como alternativa para a solução deste problema a utilização da mistura do solo existente no local da obra com a cal, descrito tecnicamente como solo-cal, que pode proporcionar melhora da resistência mecânica do solo, dependendo da constituição do solo e do teor de cal aplicado na estabilização.

Sendo assim, a intenção desta pesquisa é contribuir com o desenvolvimento sustentável e racional das construções que necessitem de melhorias das características dos solos constituintes da Formação Guabirotuba, proporcionando uma alternativa tecnicamente viável e de baixo custo para obras que necessitem de um reforço do material base com relação aos recalques.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS

De acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1984), os solos são provenientes das rochas que compõem a crosta terrestre, e sua formação deve-se à variação da temperatura da região, à penetração de água nas fissuras presentes nas rochas, à dissolução dos elementos que constituem a rocha, aos processos químicos, etc. É importante enfatizar que a composição do solo depende da rocha que a deu origem e aos elementos presentes no ambiente em que a rocha encontra-se.

O solo possui frações sólidas, líquidas e gasosas, e é formado por materiais minerais e orgânicos. A maior parte da camada superficial dos continentes, presentes no planeta Terra, é constituída por solo, que eventualmente pode ter sido modificado por interferência do homem (EMBRAPA, 2006).

Além disso, os solos são materiais naturais cuja consolidação é indefinida, apresentando em sua formação grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem. Além da disposição natural dos solos, sua composição estrutural pode apresentar-se de forma artificial, que ocorre quando transportado ou compactado mecanicamente, como em aterros, barragens de terra, reforços do subleito de pavimentos, dentre outros (NOGAMI et al., 2000).

2.2 TIPOS DE SOLOS

Vargas (1978) afirma em sua obra que o processo de formação do solo depende principalmente da natureza da rocha mãe, do clima da região, dos fatores de intemperismo, de transporte, da topografia da região e de processos orgânicos. Os fatores apresentados anteriormente podem atuar sucessivamente sobre um mesmo solo, assim os solos podem ser divididos em solos residuais, transportados, orgânicos e pedogênicos.

Para Pinto (2002), 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 o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (PINTO, 2002).

2.2.1 Solos Residuais

Os solos residuais são aqueles os quais a formação deve-se aos efeitos do intemperismo em rochas, e que a deposição do material formado ocorre no local onde a rocha que lhes deu origem está presente, constituindo assim o manto do intemperismo. As profundidades dos solos residuais dependem principalmente das condições climáticas e tempo de exposição (TERZAGHI; PECK, 1962).

As características de um solo residual concentram-se nas categorias gerais de estrutura e composição. A composição, além de estar relacionado ao material de que o solo é constituído, envolve também o tamanho e forma das partículas, e a composição mineralógica da fração fina. A composição pode ser dividida em composição física a qual se caracteriza pela porcentagem da rocha não meteorizada, distribuição do tamanho das partículas, entre outras, e pela composição mineralógica (BLIGHT; LEONG, 2012).

2.2.2 Solos Transportados

São solos sedimentados por um agente transportador, são formados geralmente por depósitos mais inconsolidados e fofos que os solos residuais, têm profundidades variáveis, de uma forma geral são menos homogêneos que os solos residuais, ocorrem somente em áreas mais restritas enquanto que os residuais são mais comuns e de ocorrência generalizada (DNER, 1996).

2.2.3 Solos Pedogênicos

Os solos de evolução pedogênica são caracterizados por serem solos superficiais e porosos, composto por uma complexa série de processos físico-químicos e biológicos que governam a sua formação. A lixiviação do horizonte superficial, a concentração de partículas coloidais no horizonte profundo e impregnação com húmus do horizonte superficial são exemplos dos complexos processos que envolvem a formação desse solo. Os solos superficiais são aráveis para a agricultura, já os porosos recobrem uma vasta área do planalto central brasileiro. Na engenharia existe pouco interesse técnico por este tipo de solo a não ser para a própria agricultura (VARGAS, 1978).

2.3 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Os sedimentos da Formação Guabirota estão distribuídos desde o município de Campo Largo até o município de Quatro Barras, abrangendo Curitiba como um todo, além de cobrir parcialmente mais seis municípios que fazem divisa com Curitiba. A geologia define o termo Formação como uma unidade de rocha que, geneticamente, representa um intervalo de tempo, curto ou longo, e pode ser composta de materiais originados de diversas fontes (FELIPE, 2011). Na figura 2.1 é possível verificar a localização de Curitiba e dos municípios que fazem fronteira com a cidade.

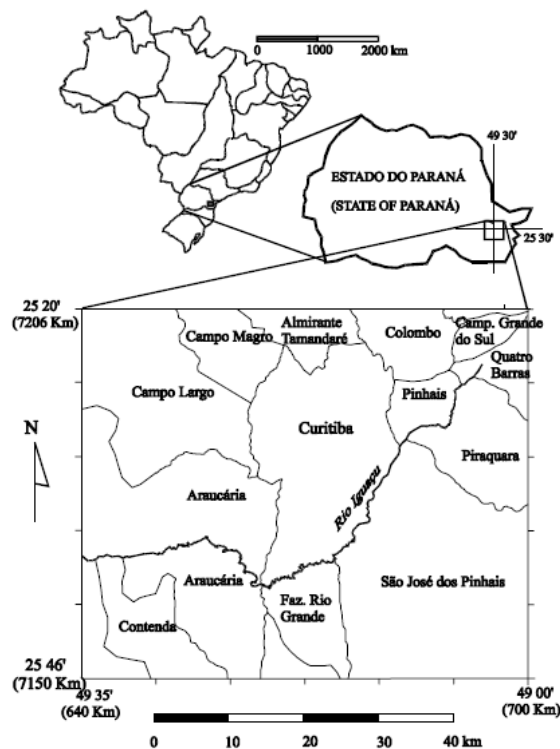


Figura 2.1 – Localização da bacia sedimentar de Curitiba
Fonte: Salamuni (1999 *apud* Kormann, 2002, p. 29).

De acordo com Felipe (2011), o nome Formação Guabirota é dado aos depósitos de sedimentos, cuja descrição da seção-tipo foi feita pela primeira vez no bairro denominado Guabirota, a leste de Curitiba, por Bigarella e Salamuni (1962), e compreendem um intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos, abrangendo os períodos do Paleógeno ao Quaternário.

Os sedimentos da Formação Guabirota repousam sobre rochas do Complexo Cristalino, e se constituem principalmente em argilas siltosas ou siltes argilosos. Parte da composição da Formação Guabirota também é constituída de

materiais granulares, conferindo uma certa diversidade aos solos da Bacia de Curitiba. Nas argilas é comum verificar cores cinza – com tonalidades às vezes esverdeada ou azulada – e marrom. A ação do intemperismo químico nos sedimentos pode torná-los avermelhados ou amarelados (SALAMUNI, 1998).

Felipe (2011) afirma em seu estudo que grande parte dos sedimentos que constituem a Formação Guabirota foi originada a partir da decomposição química de rochas Pré-Cambrianas. Os sedimentos da Formação Guabirota atingem espessuras na ordem de 60 a 80 metros e compreendem sequências litológicas nas quais predominam as argilas e areias arcólicas (20 - 40% de feldspato). 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 e Christopher (2002), em geral, os solos argilosos da Formação Guabirota possuem como característica marcante uma consistência elevada (rija a dura). Os autores afirmam também que é comum encontrar valores entre 15 a 30 golpes em sondagens de SPT logo nos primeiros metros de análise.

2.4 CONCEITOS SOBRE A ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo natural apresenta-se como um material complexo e variável, de acordo com sua localização. No entanto, devido à sua ocorrência universal e ao seu baixo custo torna-se um material bastante utilizado em obras de engenharia. (NUÑEZ, 1991).

Para Baptista (1976) estabilizar um solo é de modo geral, a utilização de um ou mais processos de natureza física, físico-química ou mecânica, de maneira a torná-lo estável para os limites de sua utilização, fazendo com que esta estabilidade permaneça sob ações de cargas exteriores e ações climáticas variáveis. A estabilização do solo está intimamente relacionada ao complemento de resistência necessário para o suporte exigido para um determinado uso de solo, em termos mecânicos, físicos, físico-químicos e químicos.

2.4.1 Tipos de Estabilização

Devido ao fato dos solos não possuírem propriedades e características bem definidas, torna-se difícil definir qual melhor método deve-se utilizar para a

estabilização do solo de determinada região. Segundo Cristelo (2001), o método de estabilização depende do número e tipo de solos em que o método realizado obteve uma ação efetiva.

Segundo Guimarães (2002), várias técnicas podem ser empregadas visando a estabilização de solos, sendo que elas são reunidas em dois grupos:

- Relativas aos meios mecânicos: correção da granulometria e da plasticidade através da incorporação ou retirada de determinadas quantidades de frações constituintes do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por normas;
- Relativas aos meios químicos: utilização de aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e outros.

A escolha pelo método de estabilização seja ela mecânica ou com a combinação de aditivos químicos, como é o caso de solos estabilizados com cal, dependem de variáveis relacionadas à fatores econômicos, à finalidade da obra, às características dos materiais e as propriedades do solo (GUIMARÃES, 2002).

2.5 SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS

A NBR 12253 (ABNT, 1992), que aborda o tema Solo-cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento, define solo-cimento como sendo o “produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, conforme este projeto, e executada conforme a NBR 12254 (ABNT, 1990).

Uma das principais diferenças entre o concreto e o solo cimento está na quantidade de pasta (cimento + água) que cada sistema apresenta. No concreto a pasta é suficiente para recobrir a superfície dos agregados e preencher os vazios existentes entre os mesmos. Já nas misturas de solo-cimento a quantidade de pasta não é suficiente para recobrir a superfície de todas as partículas de solo e preencher os vazios existentes, resultando em uma matriz cimentícia que une os grãos de agregados não-cimentados (PCA, 2004).

A mistura de cimento ao solo, para obtenção de propriedades como resistência ou deformabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia acontece quando não se dispõe de um material ou combinação de materiais com as

características de resistência, deformabilidade, permeabilidade ou durabilidade, adequadas ao projeto.

De acordo com Foppa (2005), inúmeras pesquisas sobre solos artificialmente cimentados têm sido realizadas, visando seu emprego como camada de suporte para fundações superficiais, investigando seu comportamento sob as mais diversas condições de carregamento. Foppa (2005) afirma em seu trabalho que os resultados obtidos da análise de um solo caracterizado como areia fina siltosa originado da Formação Botucatu apresentou ganhos significativos de capacidade de suporte e redução nos recalques quando misturado com material cimentante.

2.6 IMPORTÂNCIA DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

2.6.1 A Importância da Estabilização do Solo para Fundações

As fundações são os elementos estruturais de base responsáveis pela transmissão das cargas dos elementos construtivos para o solo. Para que a fundação desempenhe sua função é necessário que o solo, onde este elemento construtivo está assentado, possua capacidade de suporte adequada, estabilidade volumétrica e durabilidade.

Em regiões que apresentam solos constituídos de materiais de baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade volumétrica, geralmente apresentam como solução, para o suporte de cargas das construções, as fundações profundas. Estas atravessam o material de baixa capacidade de suporte e são assentadas em camadas subjacentes que possuem maior capacidade de suporte. Este tipo de solução técnica pode inviabilizar certas obras como é o caso dos conjuntos habitacionais de baixo custo, nos quais o investimento na execução das fundações pode representar grande parcela do valor total da obra (THOMÉ, 1994).

O tratamento do solo é um recurso que o engenheiro civil pode utilizar visando melhorar as características do solo de baixa qualidade, sem precisar gastar com a substituição do material de base, e sem ter que recorrer à métodos de fundações de alto custo.

2.6.2 A Importância da Estabilização do Solo para Pavimentação

Pavimento é a superestrutura constituída por uma combinação de camadas finitas, assentadas sobre um terreno ou fundação o qual é designado subleito, assim

cada camada de um pavimento possui funções específicas, e estão divididas normalmente em: sub-base, base e revestimento. As camadas mais externas ao subleito vão ganhando melhores propriedades mecânicas, por terem que suportar maiores cargas (DNIT, 2006).

A estrutura, construída sobre a camada final de terraplenagem é constituída de várias camadas e vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura assim constituída apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações (MERIGHI, 2004).

Para que um determinado tipo de solo seja capaz de ser utilizado como base de uma pavimentação, ou até mesmo como subleito, ele deve ser melhorado para que possa suportar o tráfego mesmo em condições desfavoráveis de umedecimento ou mesmo de secagem. Esta melhoria pode ser realizada por vários métodos de estabilização: compactação, alteração granulométrica, adição de material cimentante ou mesmo nas propriedades intrínsecas ao solo (SESSIONS, 2007). Já para os pavimentos rodoviários, os solos granulares são os mais utilizados para construção, por apresentarem um índice de resistência maior, podendo suportar grandes solicitações de carga. Atualmente, o uso de solos finos estabilizados com aditivos tem substituído esses materiais, seja pela carência de jazidas de solos mais apropriada para pavimentação, ou mesmo pelas restrições ambientais (BRANDÃO et al., 2009).

2.7 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

A mistura solo-cal é definida como a interação íntima entre o solo, a cal e a água em proporções que são determinadas através de ensaios laboratoriais. A aplicação dessa técnica fundamenta-se em reações químicas e físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, destacando-se as reações entre a cal e a fração argila (AZEVEDO et al., 1998).

De acordo com Inglês e Metcalf (1972) (apud JOHANN, 2013), a cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Os autores também afirmam que o tratamento do solo com cal é mais eficiente em solos argilosos.

Segundo Little (1999), o tratamento de solos argilosos ou muito siltosos com a adição da cal pode ser classificado como solo modificado pela cal, que ocorre

inicialmente devido a troca de cátions de cálcio fornecidos pela cal (Ca(OH)_2 ou cal hidratada) por cátions presentes no solo, cuja característica está vinculada a redução da plasticidade, redução na susceptibilidade à água e melhorias na estabilidade e trabalhabilidade do solo, e como solo estabilizado pela cal, que ocorre em função do desenvolvimento da reação pozolânica, responsável pelo acréscimo de resistência ao material tratado.

2.7.1 A Cal

A cal é considerada como o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade. De acordo com Cincotto et al. (2007), até a invenção do cimento Portland em 1824, a cal era o único aglomerante utilizado, combinado ou não com pozolanas, em construções expostas às intempéries.

Segundo Bauer (2010), cal é o nome genérico de um aglomerante simples, resultante da calcinação de rochas calcárias, que quando pura resulta na produção de óxido de cálcio puro, material com grande importância na indústria devido ao seu baixo custo, quando comparado com outros produtos aglomerantes, que são empregados na construção civil.

Diferente dos cimentos, que possuem uso adequado em obras hidráulicas, a cal possui baixa resistência à exposição frequente à água, por esse motivo a cal é denominada um aglomerante aéreo.

A resistência mecânica dos produtos cuja composição tem a cal como aglomerante são consideravelmente inferiores aos produtos obtidos com o uso de cimento Portland, pois é difícil produzir elementos com baixa porosidade quando utiliza-se a cal como aglomerante. Essa característica faz com que os produtos desenvolvidos utilizando o aglomerante cal apresentem módulo de elasticidade inferior comparado aos que utilizam cimento Portland (CINCOTTO et al., 2007).

Segundo Cincotto et al. (2007), a propriedade relativa ao módulo elástico da cal é importante devido à relação que o módulo de elasticidade possui com a rigidez dos materiais, pois a redução do módulo de elasticidade significa menor rigidez à argamassa com cal, o que potencialmente contribui para sua maior durabilidade.

Guimarães (2002) afirma que a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C , de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas, que resulta em óxido de cálcio (CaO)

e o cálcio-magnésio (CaO – MgO), denominados genericamente de cal virgem ou cal viva.

A cal na forma hidratada é obtida pela hidratação da cal viva, e é encontrada na forma de pó seco, com 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002). A cal hidratada deve obedecer às determinações da Norma Brasileira NBR 7175 (ABNT, 2003).

2.7.2 Reações Solo-Cal

A adição de cal a um solo fino em presença de água gera reações químicas responsáveis pelo tratamento do solo, que é caracterizada por uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e outra mais lenta, que pode levar meses a anos (CASTRO, 1995).

Clare e Cruchley (1957) afirmaram que quatro efeitos contribuem para o ganho de resistência de misturas solo-cal: a) formação de hidróxido de cálcio cristalino, com efeito cimentante; b) floculação e troca de íons; c) formação de carbonato de cálcio, com efeito cimentante; d) formação de silicatos e/ou aluminatos hidratados de cálcio, também com efeito cimentante.

Os fenômenos relacionados com a origem da etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração e reações químicas. A etapa lenta é caracterizada pelas reações, responsáveis pelo aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes; e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial.

2.7.2.1 Troca catiônica

Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração. Segundo os autores, a superfície do argilo-mineral é deficiente em carga, e para neutralizar essa deficiência cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamadas de dupla camada difusa. Grim (1953) (apud THOMÉ, 1994) afirmou que, assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns, associados com os solos é dada pela sequência: $Na^+ < K^+ < Ca^{2+} < Mg^{2+} < Al^{3+}$, da direita para a esquerda, ou seja, os cátions de menos

valência são substituídos por cátions de maior valência. Como a cal é uma fonte de cálcio livre, sua adição em quantidade suficiente cria uma concentração de Ca^{++} , que serão adsorvidos na superfície dos argilo-minerais.

2.7.2.2 Floculação

Herzog e Mitchell (1963), afirmaram que os processos de aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, de elevação do pH e a diminuição da espessura da dupla camada difusa, através de troca de cátions são responsáveis pelo fenômeno da floculação. A figura 2.2 apresenta uma representação das trocas de cátions ocorridas entre os elementos presentes no solo.

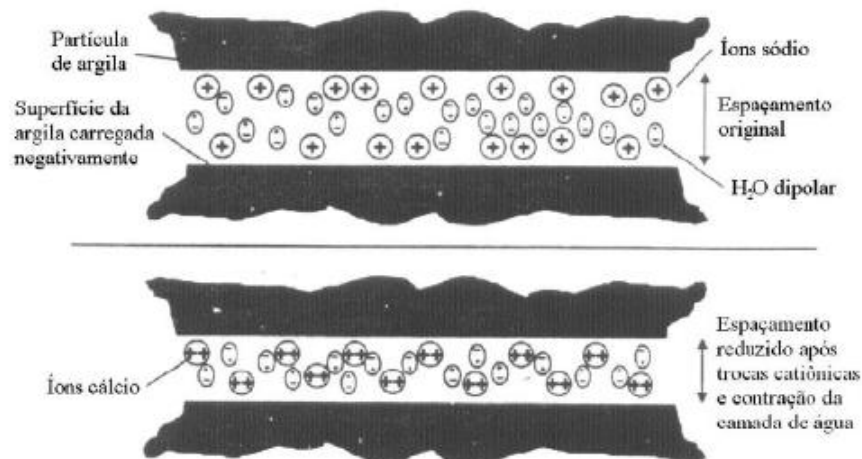


Figura 2.2 – Mecanismo de troca de cátions.
Fonte: PrusinskieBhattacharja (1999).

Esse fenômeno causa mudanças na textura da argila devido à alteração da orientação das partículas, que passam de plana e paralela para uma orientação aleatória.

2.7.2.3 Reações pozolânicas

As reações pozolânicas que acontecem entre a cal, a água, a sílica e a alumina presentes no solo, são responsáveis pelo desenvolvimento de uma matriz cimentante que conecta as partículas do solo, e possibilitam a estabilização do mesmo. Este processo que garante o aumento de resistência do sistema solo-cal é bem mais complexo e bastante influenciado pelas condições e mineralogia do solo (LITTLE, 1995).

O aumento da resistência da mistura solo-cal acontece porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes (CAMPELLO et al., 2000).

Segundo Rogers e Glendinning (2000), o pH do sistema aumenta quando os íons de hidroxilas são liberados, de modo que a sílica e a alumina são dissolvidas pela argila. Ingles e Metcalf (1972) afirmam que durante essas reações os géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio são formados, cobrindo e ligando as partículas de argila, e fechando os vazios. Após este processo os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Este processo é exemplificado na figura 2.3

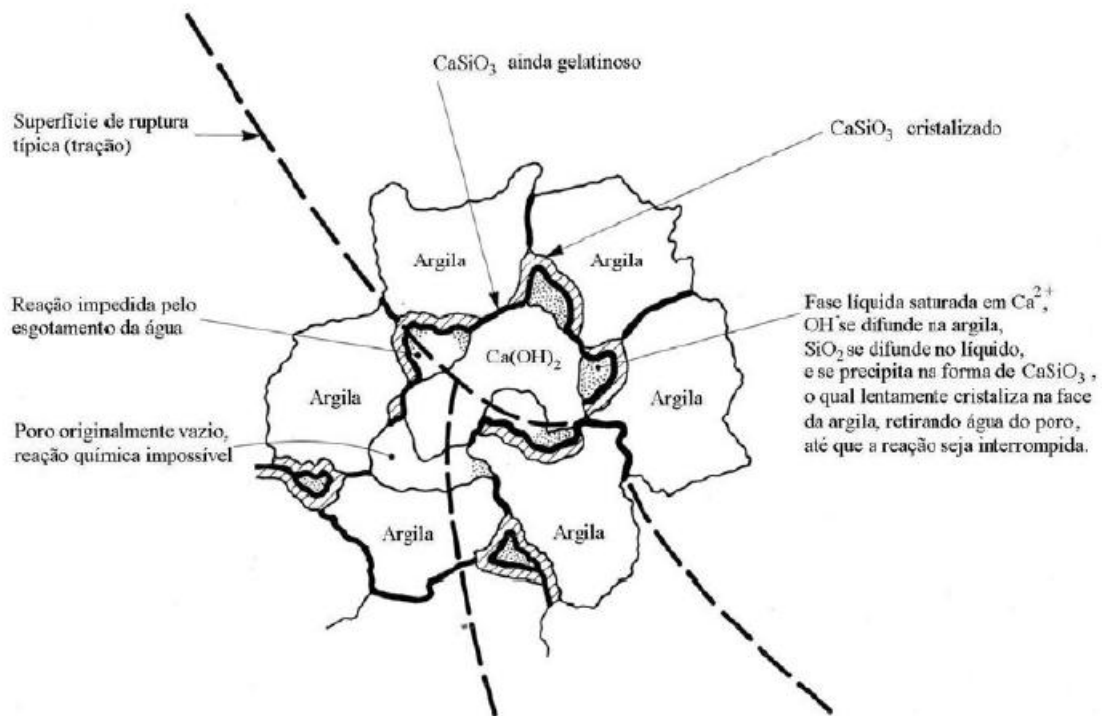


Figura 2.3 – Mecanismo de estabilização solo-cal.
Fonte: Inglês e Metcalf (1972).

Castro (1995) (apud BUENO, 2011), afirmou que existe a possibilidade dos oxí-hidróxidos de ferro e matéria orgânica bloquearem parcial ou totalmente a superfície dos cristais dos argilo-minerais, ocasionando perda de reatividade à cal.

2.7.2.4 Carbonatação

Esta reação ocorre pela combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente em bolhas de ar introduzidas no

momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução. Esta reação tende a produzir o carbonato de cálcio, na forma de um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais constituintes do solo (GUIMARÃES, 1971).

Segundo Santos (2004), a reação de carbonatação que acontece entre o dióxido de carbono presente no ar e as bolhas gasosas absorvidas pela mistura é indesejável, pois esta resulta em uma expansão do volume do solo.

Recomenda-se realizar a compactação do material após a execução da mistura solo-cal, para evitar a carbonatação. A carbonatação da cal resulta numa perda de reatividade, pois a cal na forma de carbonato torna-se inerte, influenciando negativamente no processo de estabilização.

2.8 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL

A adição de cal a um solo argiloso modifica as propriedades físicas do material, podendo proporcionar melhora na plasticidade, trabalhabilidade, e nas características de resistência, tensão-deformação e fadiga. Diversos fatores podem influenciar essas alterações, e essas variáveis estão relacionadas com o tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura (LOVATO, 2004).

2.8.1 Efeito da Relação Vazios/Cal

Segundo Larnach (1960) (apud Bueno, 2011), como não é possível retirar todo o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar na compactação de solos ou solo-cimento, a resistência não pode ser correlacionada com a relação água/cimento, pois isto só se aplica a materiais que possuem seus vazios existentes totalmente preenchidos por água, como acontece com argamassas de cimento e concretos tradicionais. Assim a relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) é equacionada da seguinte forma:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}}$$

De acordo com Johann (2013), pontos com a mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento de teor de

cal), apresentaram diferentes resistências, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cal atingem, sistematicamente, resistências maiores. Johann (2013) afirma que no solo siltoso estabilizado com cal, a ca promove a união das partículas do solo possibilitando um número maior de contato entre os grãos auxiliando na redução da porosidade e no aumento de resistência a compressão simples.

2.8.2 Característica de Compactação

Diversos autores verificaram uma diminuição do peso específico aparente máximo para solos tratados com cal quando comparado ao solo natural. Com o aumento do teor de cal o $\gamma_s \text{ máx}$ continua diminuindo (TRB, 1987).

Quando a cal é adicionada ao solo, reações de substituição entre os íons sódio monovalente da argila por íons cálcio divalentes da cal ocorrem, caracterizando o processo de floculação. Este processo é responsável pelo aumento da quantidade e do tamanho dos vazios, entretanto a estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação mesmo com o índice de vazios mais alto, reduzindo assim o $\gamma_s \text{ máx}$ do solo. Na compactação, quanto mais vazios houver, mais água é necessária para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH et al., 1998).

Osinubi (1998) constatou que quanto maior é o tempo de espera entre a mistura solo-cal e a compactação, menor é o $\gamma_s \text{ máx}$. Segundo o autor quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, influenciando na perda de resistência do material.

2.8.3 Resistência à Compressão Simples

Quando se pretende verificar a efetividade da estabilização de solos é de fundamental importância analisar aspectos relativos a fatores influentes sobre a resistência dos solos tratados. Segundo Bordignon (2015), ensaios de resistência à compressão simples em solos estabilizados têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura.

De acordo com análises realizadas por Bueno (2011), solos misturados com cal cálcica apresentam resistências maiores do que os solos tratados com cal dolomítica. O autor verificou que o solo misturado com cal cálcica apresentou resistência de 421 kN/m² aos 7 dias de cura e de aproximadamente 707 kN/m² aos 56 dias de cura. Nos solos tratados com cal dolomítica, a resistência máxima alcançada pela mistura foi de aproximadamente 360 kN/m² aos 112 dias de cura.

É importante salientar que não é apenas o tipo de cal que pode influenciar na resistência a compressão simples, mas também a composição química do solo (BUENO, 2011).

Bordignon (2015), em estudo realizado utilizando solo da formação Guabirutuba misturado com cal calcítica hidratada CH-III, verificou que a resistência para misturas solo-cal com teor de 16% de cal poderia chegar a aproximadamente 2,8 Mpa após 56 dias de cura.

2.8.4 Adensamento de Solos

Uma das propriedades de grande interesse da engenharia geotécnica envolve o estudo das deformações devidas a carregamentos verticais na superfície ou próximas à superfície do terreno, ou seja, os recalques que ocorrem nos solos quando submetidos a tensões.

Segundo Pinto (2002), estas deformações podem ocorrer rapidamente após a construção, e lentamente após a aplicação das cargas. De acordo com o autor, deformações rápidas são observadas em solos arenosos ou solos argilosos não saturados, enquanto que nos solos argilosos saturados os recalques são muito lentos, pois é necessária a saída da água dos vazios do solo.

O comportamento dos solos submetidos a carregamentos está relacionado à sua constituição e ao estado em que o solo se encontra, e pode ser expresso por parâmetros que são obtidos em ensaios como o de compressão axial e o de compressão edométrica.

A consistência elevada das argilas de Curitiba é compatível com o sobre-adensamento exibido pelo material. Valores típicos da pressão de pré-adensamento desses solos situam-se na faixa de 400 a 1000 kPa (NASCIMENTO et al., 1994). Há hipóteses que associam o sobre-adensamento da Formação Guabirotuba ao ressecamento e também à remoção de camadas de solo, no entanto, Boszczowski (2001) discute uma possível ação de agentes cimentantes.

Em solos tratados com cal existe uma tendência de diminuição das mudanças volumétricas devido à flocculação das partículas. A redução brusca das propriedades de expansão é uma significativa consequência da adição de cal aos solos (GUIMARÃES, 2002).

De acordo com Moore et al. (1987), as misturas solo-cal proporcionam uma diminuição na expansão e na contração do material tratado. O autor afirma também que esta característica é atribuída à redução da afinidade por água das argilas saturadas pelo íon cálcio e pela formação de uma matriz cimentante.

Thomé (1994) ao analisar a melhoria nas características de um solo mole, da região de Canoas-RS, tratado com cal, objetivando alcançar a viabilidade técnica do uso desse material como camada de suporte de fundações superficiais, verificou uma redução da capacidade de expansão do material em aproximadamente cinco vezes quando a mistura apresentava 5% de cal. O mesmo autor verificou uma melhora na relação carga por recalque para a mesma mistura solo-cal.

No estudo realizado por Pomatti (2000) em um solo da região de São Pedro de Alcântara-SC, composto por 13% de argila, 40,7% de silte e 46,3% de areia, estabilizado com teores de cal variando entre 2 a 7%, a expansão do solo natural que era de 2,81% teve uma redução de aproximadamente 4 vezes, quando comparado com a pior situação apresentada pelas várias misturas.

2.8.4.1 Cálculo de recalques pela compressibilidade edométrica

Em terrenos em que os solos são constituídos por camadas de diferentes compressibilidades, o recalque da camada mais compressível é considerado como equivalente aos de corpos de prova submetidos à compressão edométrica.

A variação de altura de um material devido a aplicação de um carregamento é proporcional a variação do índice de vazios, sendo que a altura das partículas sólidas permanece constante, e pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$H_1 = H_0 \cdot (1 + e_1) \text{ e } H_2 = H_0 \cdot (1 + e_2)$$

Sendo:

H_0 a altura equivalente às partículas sólidas;

H_1 a altura do conjunto partículas sólidas mais os vazios antes da aplicação da carga;

H_2 a altura do conjunto partículas sólidas mais os vazios após a aplicação da carga;

e_1 o índice de vazios antes da aplicação da carga;

e_2 o índice de vazios após a aplicação da carga.

Expressando H_0 em função de H_1 , substituindo na expressão H_2 , e sabendo que o recalque expresso por ρ é igual a diferença entre H_1 e H_2 , tem-se a seguinte equação:

$$\rho = H_1 \cdot \frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)} = \frac{H_1}{(1 + e_1)} \cdot (e_1 - e_2)$$

Para argilas saturadas o resultado do ensaio de adensamento representa o eixo das pressões aplicadas na escala logarítmica. Analisando um gráfico de adensamento percebe-se que a partir de uma determinada tensão σ_a' , o índice de vazios varia linearmente com o logaritmo do carregamento aplicado, sendo este trecho retilíneo da curva chamado de reta virgem, e dele origina-se o índice de compressão, introduzido por Terzaghi.

A equação utilizada para cálculo de recalque total do solo quando a tensão inicial e final estão presentes no trecho sobre-adensado é dependente do parâmetro de compressibilidade C_c , que pode ser expressa da seguinte forma:

$$C_c = \frac{(e_1 - e_2)}{(\log \bar{\sigma}_2 - \log \bar{\sigma}_1)}$$

O parâmetro da curva e x $\log \sigma_v'$, representado por C_c , pode ser convertido pelo parâmetro da curva ε_v x $\log \sigma_v'$, representado por C_R .

$$C_R = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

As representações gráficas de C_c e C_R são apresentadas, juntamente com os parâmetros C_s e S_R , na figura 2.4a e 2.4b respectivamente.

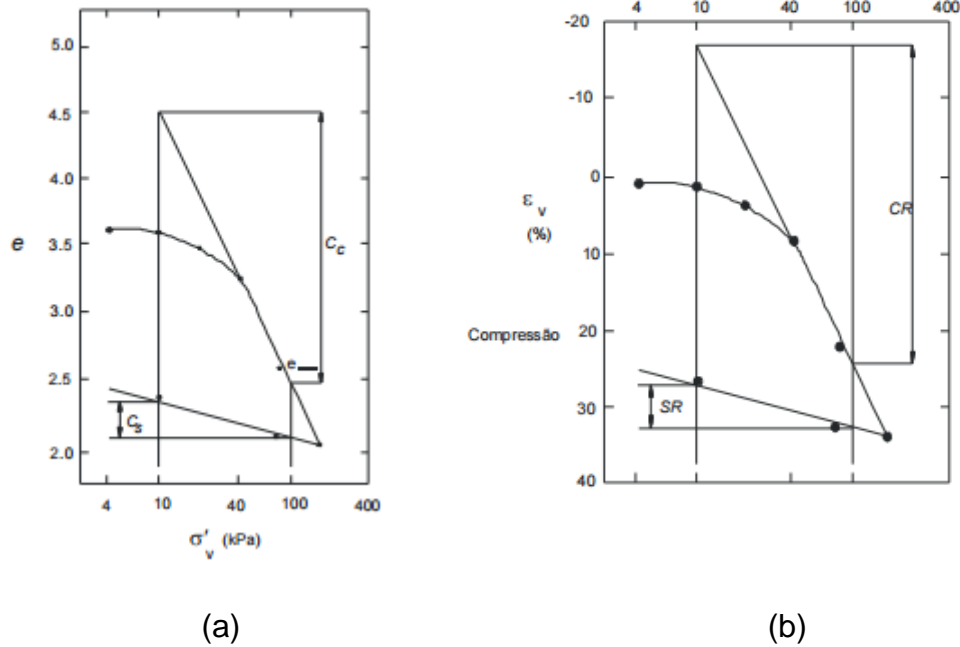


Figura 2.4 – (a) Determinação gráfica do parâmetro C_c ; (b) determinação gráfica do parâmetro C_R .
Fonte: Ortigão, 2007.

Aplicando a equação de índice de compressão na equação de recalques, tem-se para solos normalmente adensados a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{C_c \cdot H_1}{(1 + e_1)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}}\right)$$

Como é possível verificar na figura 2.4, o parâmetro C_s representa a variação do índice de vazios do período de recompressão do solo, e o parâmetro S_R representa a variação da deformação do solo no período de recompressão. Sendo assim, para solos pré-adensados, a equação para cálculo de recalque é expressa da seguinte forma:

$$\rho = \frac{C_s \cdot H_1}{(1 + e_1)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}}\right)$$

Com essa equação é possível calcular o recalque utilizando de forma indireta o índice de compressão quando o solo apresentar graficamente a reta virgem.

O valor de C_R pode ser substituído na equação anterior da seguinte forma:

$$\rho = C_R \cdot H_1 \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}}\right)$$

Em solos sobre-adensados, a trajetória desenvolvida em um carregamento se inicia sobre o trecho anterior à tensão de pré-adensamento, isto faz com que o cálculo do recalque seja diferente do que foi apresentado anteriormente, pois ele não apresenta a reta virgem. Desta forma o cálculo do recalque torna-se dependente do índice de descompressão C_d , ou pelo índice de recompressão C_R , aplicada sobre uma reta média, representativa deste trecho da curva, cujo valor está entre 10 a 20% do índice de compressão, dependendo do tipo do solo.

Para solo pré-adensado carregado além da pressão de pré-adensamento σ'_{vm} , ou seja, $\sigma'_{vf} > \sigma'_{vm}$, é utilizada a seguinte equação:

$$\rho = \frac{H_1}{1 + e_1} \cdot \left(C_r \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}} \right)$$

As figuras 2.5, 2.6 e 2.7 apresentam as situações de material pré-adensado carregado além e aquém da pressão de pré-adensamento, e de material normalmente adensado

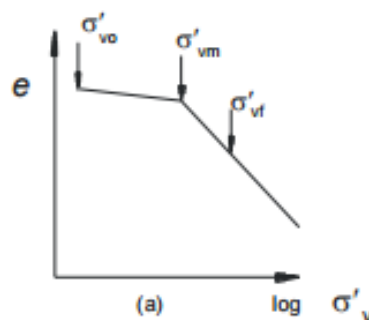


Figura 2.5 – Representação gráfica do solo pré-adensado com $\sigma'_{vf} > \sigma'_{vm}$.
Fonte: Ortigão, 2007.

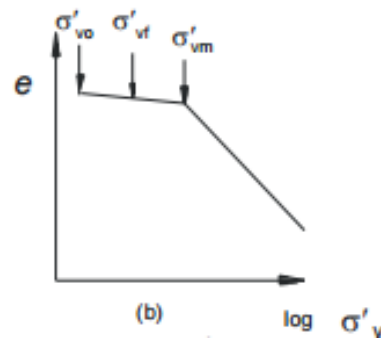


Figura 2.6 – Representação gráfica do solo pré-adensado com $\sigma'_{vf} < \sigma'_{vm}$.
Fonte: Ortigão, 2007.

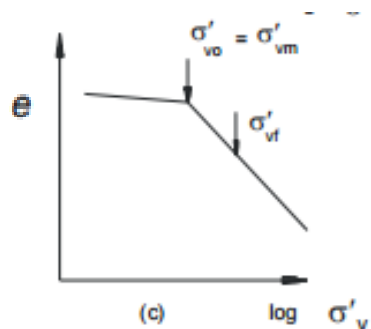


Figura 2.7 – Representação gráfica do solo normalmente adensado.
Fonte: Ortigão, 2007.

2.8.4.2 Teoria de adensamento unidimensional de Terzaghi

Como apresentado anteriormente o adensamento é o processo responsável pela ocorrência dos recalques com a expulsão da água do interior dos vazios do solo. Para compreender este fenômeno Terzaghi apresentou uma teoria baseada na analogia entre uma estrutura sólida de solo e uma mola confinada em um pistão cheio de água, sendo que a saída da água ocorre devido a existência um orifício de pequena dimensão. Dessa forma Terzaghi desenvolveu a Teoria do Adensamento, que se baseia nas seguintes hipóteses:

- O solo deve estar totalmente saturado;
- A compressão é unidimensional;
- O fluxo d'água é unidimensional;
- O solo é homogêneo;
- As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do solo;

- O solo pode ser estudado como elemento infinitesimais, apesar de ser constituído de partículas e vazios;
- O fluxo é governado pela Lei de Darcy;
- As propriedades do solo não variam no processo de adensamento;
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

Levando em consideração as hipóteses de Terzaghi, define-se o grau de adensamento relacionando a deformação ocorrida num elemento em certa posição, caracterizada pela profundidade do elemento, num determinado tempo (ε) e a deformação deste elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (ε_f), como é expresso pela equação:

$$U_z = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}$$

A deformação final devida ao acréscimo de tensão é dada pela expressão:

$$\varepsilon = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1}$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como finalidade apresentar informações gerais relacionadas aos procedimentos empregados para a realização do estudo, os quais envolvem ensaios de caracterização dos materiais empregados na pesquisa, os critérios adotados para a escolha desses materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

As amostras de solo estudadas foram coletadas para o desenvolvimento do estudo referente à análise dos efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba realizado por Bordignon (2016), obtendo as amostras em um terreno localizado na rua denominada Monsenhor Ivo Zanlorenzi, número 4722, no bairro denominado CIC (Cidade Industrial de Curitiba). Este imóvel se encontra em propriedade da união e sob administração da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Sede Ecoville.

O solo analisado é representativo dos solos típicos da região de Curitiba. Imediatamente após a coleta foram retiradas amostras para determinação da umidade natural, a qual resultou em 21%.

O critério de adoção desse solo para o estudo retirado na região se deu pelo fato de se aproveitar um material já disponível naquele local, por existir em grande quantidade, estar visivelmente sem contaminações, possuir uma uniformidade na textura e cor, se encontrar próximo ao laboratório de ensaios de solos.

Após coletado, o solo foi seco ao ar, desagregado e peneirado em peneira normatizada ABNT nº 4 de 4,8 mm, para que pudessem ser realizados os ensaios para determinar as propriedades e características do material coletado, e assim poder estabelecer alguns parâmetros fundamentais no processo de melhoramento da estabilização do solo analisado. Desta forma, a determinação da curva granulométrica, a densidade real dos grãos, limites de Atterberg e a curva de compactação que determina o teor ótimo de umidade e o peso específico aparente seco ótimo foram realizados neste trabalho, e são apresentados posteriormente.

3.1.2 Propriedades do Solo Estudado

O solo, além de poder ser classificado pela sua origem, pode ser classificado de acordo com suas propriedades, como é o caso da engenharia rodoviária, cuja classificação básica é feita em termos da dimensão das suas partículas. O solo pode conter grãos de argila, silte e areia, e, por vezes, agregados maiores, como cascalho e pedras. Para determinar a percentagem de cada fração presente no solo é feita a análise granulométrica. No Brasil, adota-se a NBR 6502 (ABNT, 1995).

De acordo com Bordignon (2015), a Classificação USCS (*Unified Soil Classification System*), é um sistema unificado de classificação de solos, que surgiu como uma evolução do (*Airfield Classification System*), denominado de classificação AC. A classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) ou USCS (*Unified Soil Classification System*) foi desenvolvida originalmente pelo professor Arthur Casagrande, na Universidade de Harvard, EUA, entre os anos de 1942 e 1944, visando à aplicação na seleção de materiais para projetos de pavimentos de aeroportos, sendo conhecida também como sistema de classificação de aeroportos. Nesta classificação os solos são divididos em:

- solos de granulometria grossa;
- solos de granulometria fina e;
- solos altamente orgânicos.

Essas três divisões são ainda subdivididas em 15 grupos básicos. Os parâmetros determinantes para a classificação são a granulometria e os limites de Atterberg. Os solos são classificados quanto ao tamanho das partículas em pedregulho, areia, silte ou argila.

O processo para a classificação segundo a SUCS inicia-se determinando se o solo é orgânico, de graduação grossa ou fina, em seguida com os dados da granulometria e dos limites de Atterberg, define-se a que grupo pertence, consultando-se a tabela de classificação SUCS. Ainda para a classificação da fração fina, utilizam-se os valores dos limites de Atterberg e o chamado gráfico de plasticidade.

3.1.2.1 Análise granulométrica do solo estudado

A análise granulométrica dos solos consiste em classificar o material granular por meio de ensaio realizado por peneiramento e por sedimentação. O ensaio granulométrico deve ser efetuado conforme a NBR 7181 (ABNT, 1988). Na figura 3.1

é possível observar a sequência de peneiras e um agitador eletromecânico da marca Lucadema que são utilizados para a execução do ensaio.

O ensaio ocorre primeiramente com o peneiramento da fração grossa e da fração fina, e posteriormente é realizado ensaio de sedimentação da fração de silte e argila. Na etapa de ensaio de sedimentação deve-se utilizar o defloculante hexametáfosfato de sódio, que funciona como desagregador das partículas de solo.



Figura 3.1 – Agitador de peneiras utilizado no ensaio de peneiramento do solo

Fonte: Bordignon (2015).

Ao realizar a análise granulométrica por peneiramento, Bordignon (2015) verificou que para a amostra de solo retirada de uma região compreendida na Formação Guabirotuba, 47% representava pedregulho, 32% constituído de areia, 9% eram referentes à silte e a fração argila era composta por 12% do total, sendo a amostra do solo estudado caracterizada como areia de granulometria fina, com presença de silte e argila, segundo a NBR 7181 (ABNT, 1988).

De acordo com a curva granulométrica pertencente ao solo analisado, apresentada na Figura 3.2, verifica-se a existência de frações siltosas e argilosas com uma uniformidade e nivelamento entre estas duas frações, perfazendo uma diferença de apenas 3% entre elas.

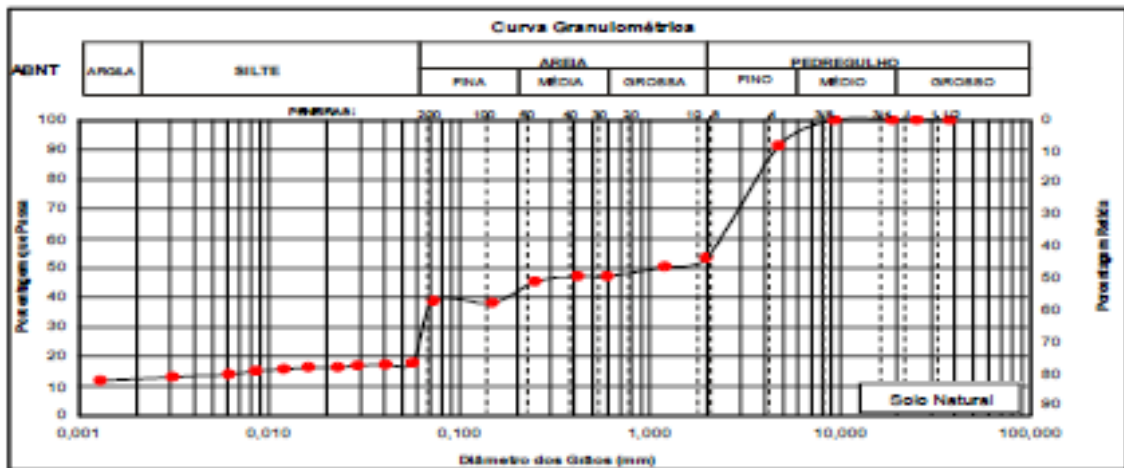


Figura 3.2 – Curva granulométrica do solo natural; ensaio de granulometria conjunta.
Fonte: Bordignon (2015).

Com o objetivo de classificar as frações siltosas e argilosas identificadas na curva granulométrica, realizou-se o ensaio de granulometria por sedimentação do material passante na peneira número 10 ou de 2,0 mm, como estabelece a NBR 7181 (ABNT, 1984).

O resultado demonstra que o uso do defloculante aumenta as porcentagens de partículas finas retidas, correspondendo assim às frações de silte e argila.

3.1.2.2 Limites de Atterberg do solo estudado

Os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, chamados de limites de Atterberg, nos fornecem informações sobre o material, quanto à sua trabalhabilidade, variação de volume e absorção de água, conforme demonstrado na figura 3.3. Os limites de Atterberg do solo são determinados de acordo com as metodologias propostas pelas normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1988).

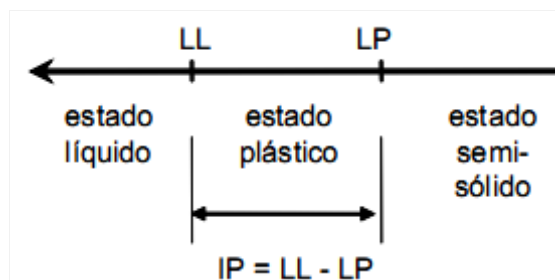


Figura 3.3 – Esquema simplificado dos limites de consistência do solo.
Fonte: Greco (2007).

O Limite de Liquidez (LL), obtido pelo ensaio realizado com o equipamento de casa grande, fornece o teor de umidade do solo, e marca a transição do estado plástico ao estado líquido do material. O Limite de Plasticidade (LP) também dado em porcentagem é o teor de umidade com o qual se consegue fazer um cilindro, com uma pequena massa de solo, de 3 mm de diâmetro com 6 a 10cm de comprimento.

O Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) do solo natural originado da Formação Guabirotuba analisado por Bordignon (2015) atingiram 37% e 33% respectivamente, obtendo-se um índice de plasticidade de 4%, considerado como um solo fracamente plástico segundo a ABNT.

3.1.2.3 Massa específica real dos grãos do solo estudado

Para a determinação da massa específica real dos grãos (GS) deve-se utilizar a NBR 6508 (ABNT, 1984), procedimento no qual se usa o picnômetro como instrumento. Este ensaio pode ser observado na figura 3.4.



Figura 3.4 – Detalhe do ensaio para determinação da massa específica.

Fonte: Bordignon (2015).

De acordo com os procedimentos determinados pela NBR 6508 (ABNT, 1984), Bordignon (2015) encontrou o valor de 2,62 para massa específica real dos grãos.

3.1.2.4 Compactação do solo estudado

O ensaio de compactação deve ser realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), para a amostra de solo natural bem como para as misturas pré-estabelecidas de solo com a cal hidratada em pó. Este procedimento visa a densificação do solo e a obtenção do peso específico aparente seco (γ_s máx.) e da umidade ótima ($W_{ót}$) do mesmo. Para o desenvolvimento deste trabalho utiliza-se a energia de compactação do Proctor Normal, a qual é constituída de três camadas, sendo 26 golpes por camada. A compactação é executada em um molde cilíndrico com 100 mm de diâmetro por 127 mm de altura, conforme NBR 7182 (ABNT, 1986)

Com os resultados obtidos neste ensaio torna-se possível relacionar o peso específico seco máximo do solo e sua umidade ótima de compactação. O objetivo deste ensaio é determinar o fator água-aglomerante para moldagem dos corpos-de-prova.

Na tabela 3.1 estão presentes os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco encontrados a partir dos ensaios de compactação com energia normal e energia intermediária realizada por Bordignon (2015).

Tabela 3.1 – Resultados da análise dos ensaios de compactação

Medidas	Solo + adição para a energia normal de compactação				
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
$W_{ót}$ (%)	26,42	27,02	27,32	25,62	26,53
Y_d máx	1,515	1,510	1,491	1,509	1,481
Medidas	Solo + adição para a energia intermediária de compactação				
Teor de Cal (%)	0 (%)	3 (%)	6 (%)	8 (%)	16 (%)
$W_{ót}$ (%)	25,55	24,48	25,27	24,75	24,08
Y_d máx	1,554	1,598	1,563	1,578	1,561

Fonte: Bordignon (2015).

3.1.3 A Cal

A cal utilizada é do tipo calcítica hidratada CH-III, da marca ITABRANCA, fabricado pela EB indústria e comércio de cal Ltda, a qual se encontra em conformidade com as normas ABNT – NBR 6473 (ABNT, 2003) e NBR 7175 (ABNT, 2003). Com isso obtemos os parâmetros necessários para a realização dos ensaios,

conforme determina a norma do DER/PR ES-P 14/05, o qual recomenda a cal hidratada cálcica, com teor mínimo de 50% de cal solúvel (CaO + CaOH₂), determinado segundo as especificações e método da NBR 6473/03. A cal CH-III foi escolhida também por ser um tipo de cal mais comercializada e utilizada na região.

3.1.4 Água

A água utilizada na execução dos ensaios, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova, deverá ser uma água potável fornecida pela empresa de abastecimento do estado do Paraná. Sendo que para os ensaios de caracterização deve ser utilizada água destilada, quando os mesmos forem solicitados pela respectiva norma.

3.2 MÉTODOS

A definição dos métodos e o planejamento de execução dos ensaios e experimentos são fatores importantes para a obtenção de resultados precisos e consistentes em um trabalho. Outro fator relevante no desenvolvimento de trabalhos científicos e acadêmicos é a correta descrição dos procedimentos utilizados para a realização do trabalho, pois garante a validação dos resultados obtidos, possibilitando a reprodução ou até mesmo a continuidade dos estudos. A seguir são apresentados com detalhes os métodos que foram utilizados na pesquisa, a escolha dos traços para análise e os equipamentos.

3.2.1 Massa Específica Real dos Grãos dos Solos Contendo Cal

Com a intenção de obter-se a massa específica real dos grãos das misturas, para possibilitar o cálculo do índice de vazios de cada mistura, foi realizado o ensaio definido na NBR 6508 (ABNT, 1984), da mesma forma que foi realizado para o solo natural.

Os resultados do ensaio para cada amostra pode ser observado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores da densidade aparente real dos grãos das misturas

Propriedade Analisada	Solo + 3% de Cal	Solo + 6% de Cal	Solo + 8% de Cal	Solo + 16% de Cal
Densidade aparente real do grão GS	2.71	2.69	2.64	2.68

Fonte: A autoria própria.

3.2.2 Ensaio de Compressão Oedométrica

Segundo a NBR 12007 (ABNT, 1990), este ensaio consiste em determinar as propriedades de adensamento do solo, caracterizadas pela velocidade e magnitude das deformações, quando o solo é lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado.

De acordo com Pinto (2002), o ensaio simula o comportamento de compressão sobre o solo quando ocorre a ação de forças, como por exemplo, a deposição de material em uma grande área para a construção de um aterro. O autor afirma também que este ensaio representa situações em que se pode admitir que o carregamento feito na superfície, ainda que em área restrita, provoquem no solo uma deformação apenas de compressão, sem haver deformações laterais.

O ensaio é realizado em um corpo-de-prova cilíndrico, confinado por um anel de aço. No topo e na base, são colocadas pedras porosas para permitir a drenagem. A carga vertical é transmitida através de uma placa de distribuição rígida, que serve para uniformizar pressões, e uma bacia de saturação permite manter a amostra saturada evitando a perda de umidade durante o ensaio (ORTIGÃO, 2007), como é representado na Figura 3.5.

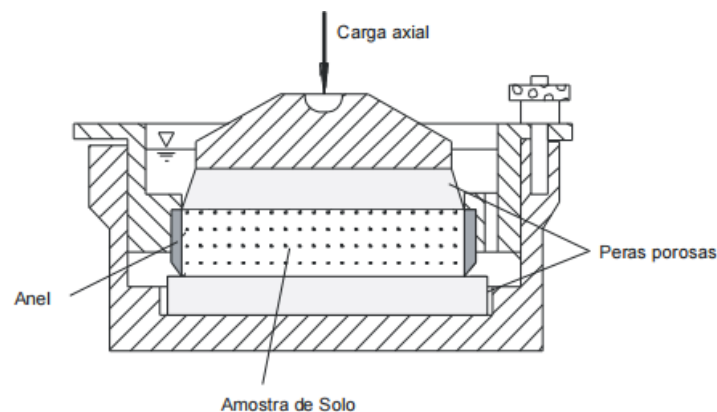


Figura 3.5 – Representação do dispositivo utilizado no ensaio oedométrico.

Fonte: Ortigão, 2007.

3.2.3 Desenvolvimento dos Ensaios

3.2.2.1 Determinação da dosagem da mistura solo-cal

Para realizar os ensaios foram separadas 5 amostras de solos, sendo que uma das amostras continha solo sem adição de cal e as outras amostras foram

misturadas com 3%, 6%, 8% e 16% de cal hidratada em pó, como pode ser observado na figura 3.6.

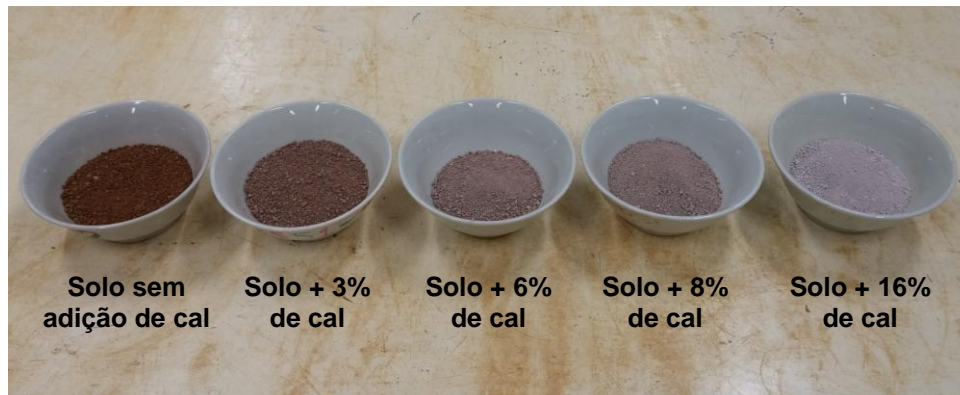


Figura 3.6 – Amostras utilizadas para a realização do ensaio com suas respectivas adições.

Fonte: Autorial Própria.

Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), fundamentam-se no pH da mistura solo-cal para determinar a dosagem de cal na mistura. O princípio básico deste procedimento é adicionar uma quantidade suficiente de cal de modo a assegurar um pH de 12,4, para a ocorrência das reações pozolânicas que proporcionam resistência à mistura.

Desta forma, a partir dos resultados encontrados por Bordignon (2015), de acordo com o método estabelecido por Eades e Grim (1966 *apud* Núñez, 1991), apresentado na tabela 3.3, determinou-se os teores de cal que definiriam as amostras dos ensaios.

Segundo Dias et al. (2003 *apud* Ide et al, 2005), a indicação de um teor mínimo de cal igual a 3% deve-se ao fato de que valores inferiores normalmente proporcionam baixa reatividade nos solos. Já o teor máximo seria de 10%, por razões econômicas. No entanto, as reações pozolânicas, responsáveis pelo ganho de resistência ao longo do tempo (reações lentas), dependem de quantidades significativas, normalmente superiores a 10%, para ocorrerem.

Tabela 3.3 – Resultado do ensaio de ph para as misturas definidas

Solo + Teor da Cal	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média dos pHs
0%	7,9	7,8	8,0	7,9	7,9
3%	9,4	9,5	9,6	9,5	9,5
6%	11,1	11,0	11,3	11,1	11,1
8%	12,1	12,0	12,1	12,1	12,1
16%	12,3	12,2	12,2	12,1	12,2
Cal Pura (CHIII)	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5
Água	8,7	8,6	8,7	8,6	8,6

Fonte: Bordignon (2015).

3.2.2.2 Equipamentos utilizados e desenvolvimento do ensaio oedométrico

Os equipamentos utilizados para o desenvolvimento desse ensaio foram célula de adensamento (célula oedométrica), com dimensões de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, pedras porosas, prensa para aplicação de carga e pesos, extensômetro e computador para registro de dados.

Antes de realizar o preparo das amostras, e sabendo informações referentes ao volume do anel de adensamento, igual a 39,27cm³, e peso específico das amostras, foi calculada a quantidade de material necessário para moldar cada corpo de prova, como pode ser verificado na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Cálculo da quantidade de material para moldar cada corpo de prova

Amostras	Teor de Umidade Ótima (%)	γ_d máx	Peso do Anel (g)	Massa Seca (g)	Massa de Água (g)	Massa Total (g)
Solo sem adição de cal	26.42	1.515	68.67	59.49	15.72	143.88
Solo + 3% de Cal	27.02	1.51	68.69	59.30	16.02	144.01
Solo + 6% de Cal	27.32	1.491	68.69	58.55	16.00	143.24
Solo + 8% de Cal	25.62	1.509	68.67	59.26	15.18	143.11
Solo + 16% de Cal	26.51	1.481	68.69	58.16	15.42	142.27

Fonte: Autoria Própria.

Após determinar a quantidade necessária de material para moldar cada corpo de prova, foi verificada a umidade contida em cada amostra, para que no momento de preparo do solo com diferentes teores de cal, fosse adicionada apenas

a quantidade de água necessária para fazer com que o material atingisse o valor da umidade ótima.

O preparo do material foi feito separando 100 gramas de cada amostra, e em cada uma delas foi adicionada a quantidade de água, proporcional a quantidade de material reservado, para atingir a umidade ótima. Na tabela 3.5 pode-se verificar os valores relativos à quantidade de material separado em função da umidade contida nas amostras.

Tabela 3.5 – Valores da quantidade de material separado para o ensaio

Amostras	Umidade Ótima (%)	Umidade Inicial	Peso do Anel (g)	Massa Umida (g)	Umidade Contida na Massa (g)	Massa de Água Adic. (g)	Massa Total (g)
Solo sem adição de cal	26.42	6.07	68.67	100	6.07	20.35	189.02
Solo + 3% de Cal	27.02	5.71	68.69	100	5.71	21.31	190.00
Solo + 6% de Cal	27.32	7.04	68.69	100	7.04	20.28	188.97
Solo + 8% de Cal	25.62	6.95	68.67	100	6.95	18.67	187.34
Solo + 16% de Cal	26.51	4.6	68.69	100	4.60	21.91	190.60

Fonte: Autoria Própria.

Com a quantidade de material devidamente preparada foi moldado o corpo de prova por meio de compactação feito diretamente no anel oedométrico, como é possível verificar na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Verificação da quantidade de material necessária para efetuar o ensaio.

Fonte: Autoria Própria.

Após ter sido preenchido e compactado, o corpo de prova foi pesado para conferir se o anel continha a quantidade de material calculado. Na tabela 3.6 estão presentes os valores do material pesado.

Tabela 3.6 – Quantidade de material utilizado no ensaio

Amostras	Peso do Anel (g)	Massa Seca (g)	Massa de Água (g)	Massa Total (g)
Solo sem adição de cal	68.67	58.97	15.58	143.22
Solo + 3% de Cal	68.69	59.25	16.01	143.95
Solo + 6% de Cal	68.69	60.01	16.4	145.1
Solo + 8% de Cal	68.67	61.45	15.74	145.86
Solo + 16% de Cal	68.69	58.41	15.48	142.58

Fonte: Autorial Própria.

Na figura 3.8 pode-se observar o material compactado na célula de adensamento e montado no dispositivo utilizado para o ensaio.



Figura 3.8 – Dispositivo contendo a célula de adensamento com a amostra compactada.

Fonte: Autorial Própria.

Cada amostra foi submetida ao ensaio de adensamento que consistia na aplicação de estágio de carregamentos que geravam tensões verticais de 49,95kPa, 99,90kPa, 199,80kPa, 399,60kPa, 799,20 kPa e 1598,40kPa, com o objetivo de verificar a influência dessas tensões com relação ao deslocamento vertical para cada amostra.

A prensa utilizada para realizar o ensaio consiste em uma mesa composta por um braço de alavanca onde são colocados os pesos em uma haste, que transfere a força, multiplicada por 10 vezes, para as células de adensamento, gerando as tensões necessárias para o desenvolvimento do ensaio, como é apresentado na figura 3.9.



Figura 3.9 – Prensa de adensamento utilizada para o desenvolvimento do ensaio proposto.

Fonte: Autoria Própria.

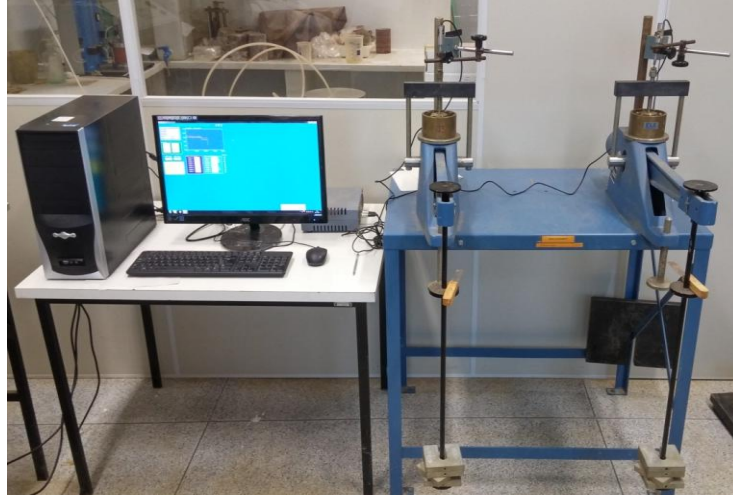
A sequência de carregamento realizada no ensaio foi de 1kg, 2kg, 4kg, 8kg, 16kg e 32kg, que eram aplicados no corpo de prova, por meio da alavanca, responsável por gerar as tensões citadas anteriormente. Os pesos utilizados e a sequência de aplicação podem ser observados na figura 3.10.



Figura 3.10 – Representação dos pesos utilizados e a sequência de aplicação.

Fonte: Autoria Própria.

O registro dos deslocamentos foi feito utilizando o LVDT – displacement transducer, unidade analógico-digital integrada a um computador, como é observado na figura 3.11.



**Figura 3.11. – Prensa de adensamento integrada ao equipamento de obtenção de dados.
Fonte: Autoria Própria.**

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise realizada por meio do ensaio oedométrico para solos da Formação Guabirotuba estabilizado com diferentes teores de cal, proposto por este trabalho, foram verificadas as propriedades relativas às variações de deslocamentos verticais (recalques), a variação do C_v de cada mistura e a variação do índice de vazios com relação as pressões aplicadas para definição do C_c .

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS RECALQUES OCORRIDOS NAS AMOSTRAS

4.1.1 Análise dos ensaios de adensamento para o primeiro carregamento

Ao comparar os ensaios de adensamento para o primeiro carregamento, referente ao carregamento de 1 quilograma, o qual exerce uma tensão normal de 49,95 kPa no corpo de prova, verificou-se que a adição de cal auxiliou na redução do deslocamento vertical para todas as amostras, exceto para a amostra com adição de 3% de cal, que deslocou aproximadamente 0,11 mm verticalmente. A amostra com teor de 16% de cal apresentou um recalque de 0,04 mm, superior ao das amostras contendo 6% de cal e 8% de cal, que apresentaram deslocamentos verticais semelhantes próximos a 0,02 mm, como pode ser observado na figura 4.1.

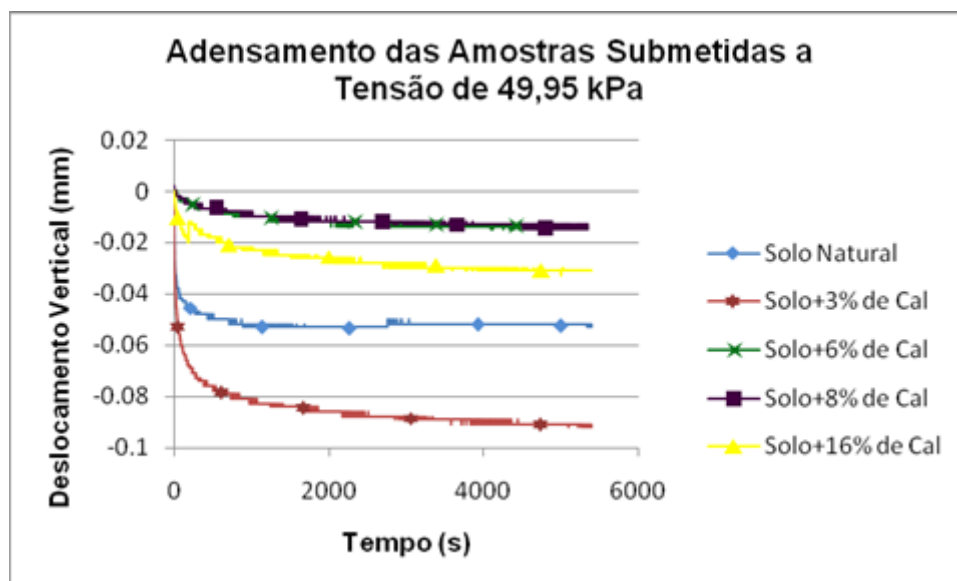


Figura 4.1 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o primeiro carregamento (Pressão de 49,95 kPa).

Fonte: Autoria Própria.

Quando comparado o menor deslocamento vertical, pertencente aos solos com adição de 6% e 8% de cal, com o maior deslocamento vertical, referente ao solo com 3% de adição de cal, é possível verificar uma queda de aproximadamente 83% no recalque do solo com maior adensamento. No entanto, a diferença entre o recalque dos solos contendo 6% de cal e 8% de cal com relação ao solo natural foi de aproximadamente 62%.

4.1.2 Análise dos ensaios de adensamento para o segundo carregamento

Ao analisar os dados presentes nas curvas da figura 4.2, pode-se verificar que os resultados das amostras submetidas ao segundo carregamento, referente ao carregamento de 2 kg, o qual exerce a pressão de 99,90 kPa no corpo de prova, apresentou características semelhantes aos do adensamento cuja pressão foi de 49,95 kPa, no entanto a curva de deslocamento vertical para a amostra contendo 16% de cal, cujo deslocamento vertical foi 0,04 mm, próximo do recalque ocorrido no primeiro carregamento, aproximou-se mais da curva de deslocamento do solo contendo 6% de cal, que adensou 0,03 mm, assim como a curva de deslocamento do solo misturado com 3% de cal que variou 0,13 mm aproximando-se um pouco mais da curva do solo sem adição de cal que recalcou 0,09 mm.

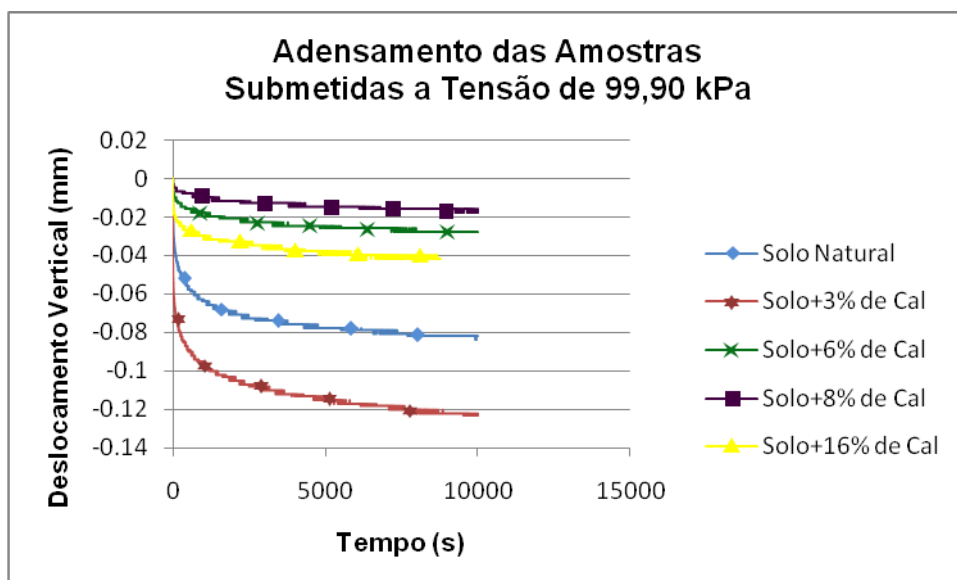


Figura 4.2 – Comparação dos deslocamentos verticais entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o segundo carregamento (Pressão de 99,90 kPa).
Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar o maior e o menor recalque, 0,13mm para o solo misturado com 3% de cal e 0,02mm para o solo com 8% de cal respectivamente, para o segundo carregamento, foi possível verificar uma redução de aproximadamente 84% no recalque total do material, e a diferença entre o valor do menor recalque e do recalque do solo natural foi de aproximadamente 76%.

4.1.3 Análise dos ensaios de adensamento para o terceiro carregamento

Os adensamentos ocorridos no terceiro carregamento, relativo à tensão de 199,80 kPa aplicada nas amostras, foram de 0,14 mm, 0,17 mm, 0,074 mm, 0,05 mm e 0,082 mm para as amostras de solo sem adição de cal, solo com 3% de cal, solo com 6% de cal, solo com 8% e solo com 16% de cal respectivamente. Nesta etapa, apesar de o adensamento da amostra de 3% permanecer superior ao do solo natural, e de do adensamento da amostra de 16% ser superior ao dos solos contendo 6% e 8% de cal, a diferença entre o deslocamento vertical do solo sem adição de cal e o deslocamento vertical do solo contendo 3% de cal, assim como entre as amostras de solo com 6% e 16% de cal, apresentaram reduções quando comparado com o adensamento das amostras sob a tensão de 99,90 kPa, como apresentado na figura.

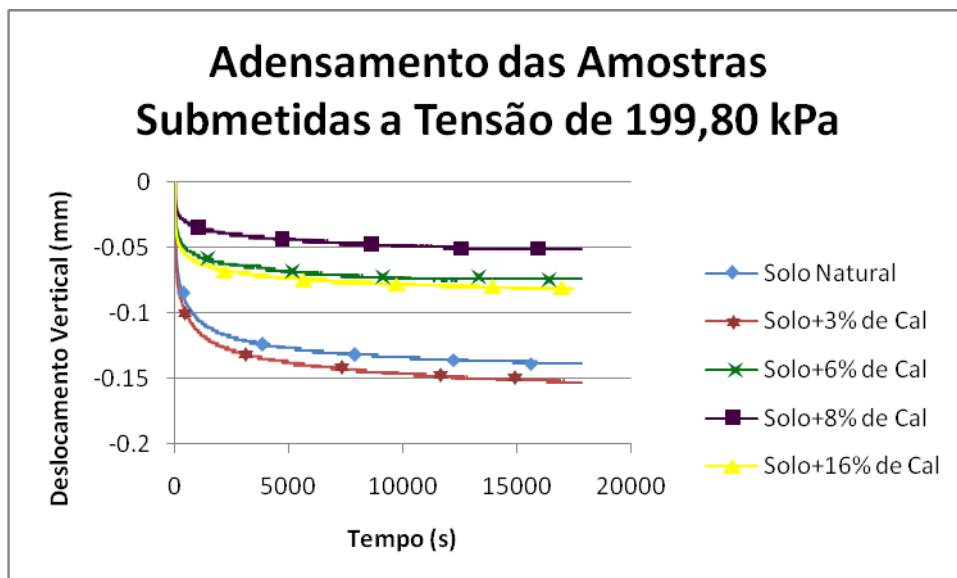


Figura 4.3 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o terceiro carregamento (Pressão de 199,80 kPa).
Fonte: Autoria Própria.

A variação de adensamento para o terceiro carregamento (tensão 199,80kPa) foi de aproximadamente 69% quando comparado com o solo contendo 3% de cal e o solo com 8% de cal, maior e menor deslocamento vertical respectivamente, aproximando-se da diferença entre o deslocamento vertical do solo com 8% de cal e do solo natural foi de aproximadamente 64%.

4.1.4 Análise dos ensaios de adensamento para o quarto carregamento

Durante o quarto carregamento, pertencente à tensão de 399,60 kPa aplicada nas amostras, os deslocamentos verticais atingiram 0,34 mm, 0,28 mm, 0,12 mm, 0,078 mm e 0,105 mm para as amostras de solo sem adição de cal, solo com 3% de cal, solo com 6% de cal, solo com 8% e solo com 16% de cal respectivamente. Neste carregamento a amostra contendo 3% de cal se comportou como o esperado, tendo seu recalque inferior ao do solo sem adição de cal, já o solo misturado com 16% de cal obteve um adensamento superior ao do solo com 8% de cal, apesar de ter reduzido seu deslocamento com relação à mistura de solo com 6% de cal, como pode ser observado na figura 4.4.

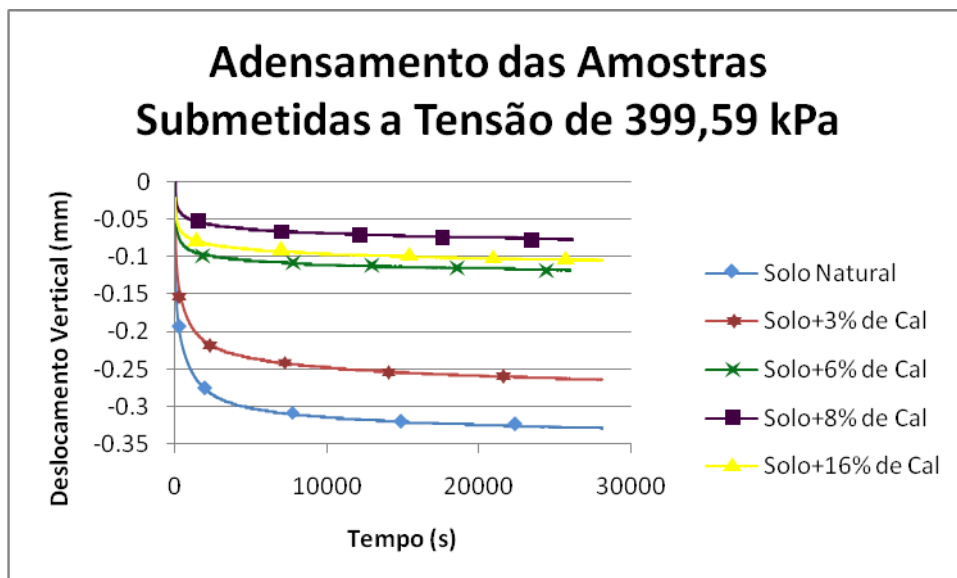


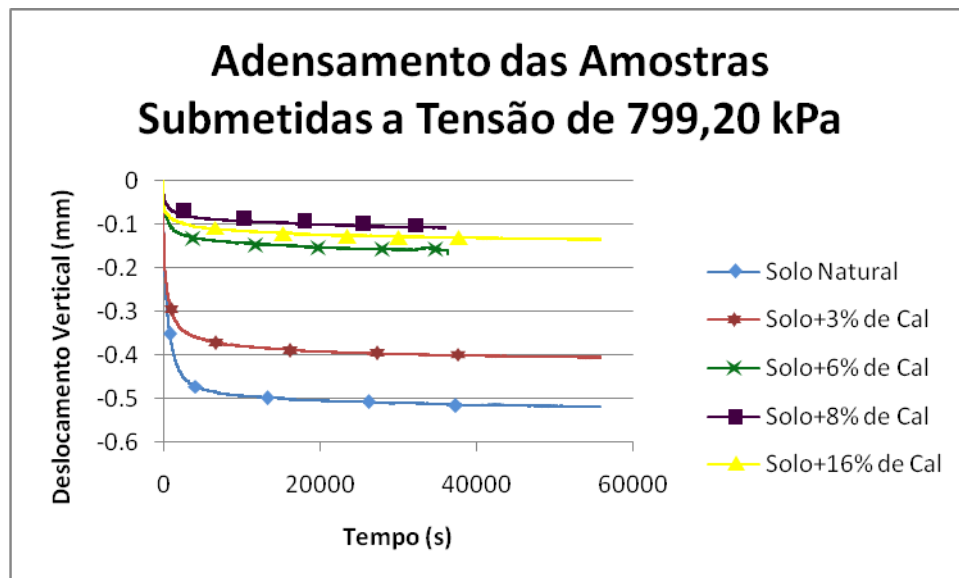
Figura 4.4 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o quarto carregamento (Pressão de 399,60 kPa).
Fonte: Autoria Própria.

O quarto carregamento apresentou uma variação de aproximadamente 77% entre o solo sem adição de cal (maior recalque) e o solo com adição de 8% de cal (menor recalque).

4.1.5 Análise dos ensaios de adensamento para o quinto carregamento

No quinto carregamento a tensão de 799,20 kPa aplicada nos corpos de prova contendo solo sem adição de cal, solo misturado com 3% de cal, solo com 6% de cal, solo com 8% de cal e solo com 16% de cal, provocou deslocamentos de 0,53mm, 0,42 mm, 0,16 mm, 0,11 mm e 0,14 mm respectivamente, apresentando comportamentos semelhantes aos observados durante o quarto carregamento, como é apresentado na figura 5.5.

A variação entre os valores de adensamento do solo sem adição de cal e do solo com 8% de cal, os quais se referem ao maior e menor deslocamento vertical durante o quinto carregamento, foi de aproximadamente 79%.



**Figura 4.5 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o quinto carregamento (Pressão de 799,20 kPa).
Fonte: Autoria Própria.**

4.1.6 Análise dos ensaios de adensamento para o sexto carregamento

Durante o último carregamento em que a tensão equivale a 1598,4 kPa, o menor deslocamento vertical permanece referente ao solo contendo 8% de cal, sendo igual a 0,21mm, seguido pela mistura de solo com 16% de cal, em que o recalque atingiu 0,25mm. Os deslocamentos posteriores foram de 0,34mm, 0,64mm e 0,71mm, pertencentes as amostras contendo 6% de cal, 3% de cal e da amostras de solo sem adição de cal, respectivamente.

A diferença entre o maior deslocamento vertical, o qual está relacionado ao solo sem adição de cal, e o menor deslocamento vertical o qual está relacionado

com o solo misturado com 8% de cal foi de aproximadamente 0,5mm, apresentando uma redução de 70% com relação ao recalque máximo.

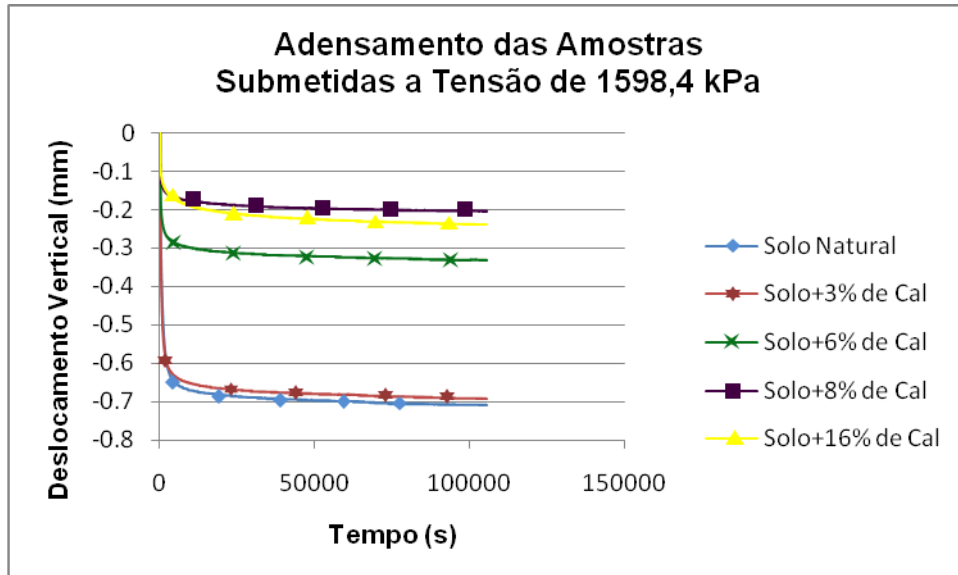


Figura 4.6 – Comparação do deslocamento vertical entre as diferentes amostras das misturas solo-cal para o sexto carregamento (Pressão de 1598,4 kPa).

Fonte: Autoria Própria.

4.1.7 Análise geral dos resultados dos ensaios de adensamento

Analisando de uma forma mais abrangente os resultados apresentados, pode-se verificar que cada amostra apresentou comportamentos distintos de acordo com o passar do tempo e com a adição de tensão, como é o exemplo do solo contendo 3% de cal, que apresentou recalque superior ao do solo natural até o quarto carregamento, situação que pode ter ocorrido devido ao fato de a amostra conter uma quantidade de cal que não seria capaz de oferecer resistência mecânica ao material, porém fosse suficiente para aumentar a trabalhabilidade do solo.

Outra situação interessante refere-se à amostra de solo contendo 16% de cal. Como é possível observar, os deslocamentos verticais ocorridos no solo misturado com 16% de cal foram mais intensos do que os apresentados nos solos com 6% e 8% de cal até o quarto carregamento. A grande quantidade de material cimentante pode ter sido responsável por este acontecimento, pois a capacidade de suporte inicial oferecida pela cal pode ter sido reduzida devido à propriedade plastificante do aglomerante provocando uma lubrificação entre as partículas do solo. No entanto com o passar do tempo os recalques sofridos pelo solo com 16% de cal foram sendo

amenizados devido ao ganho de resistência proporcionado pela cal, sendo seu deslocamento superior apenas ao do solo contendo 8% de cal.

Os valores de recalque para cada etapa de carregamento referente a cada mistura de solo com cal é apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores dos deslocamentos verticais das misturas de solo em cada etapa de carregamento

Etapas de Carregamento		Solo Natural	Solo+3%	Solo+6%	Solo+8%	Solo+16%
Carregamento	Pressão (kPa)	def.24 (cm)	def.24 (cm)	def.24 (cm)	def.24 (cm)	def.24 (cm)
Primeiro	49.9490835	0.005	0.011	0.002	0.002	0.004
Segundo	99.89816701	0.009	0.013	0.003	0.002	0.004
Terceiro	199.796334	0.014	0.017	0.007	0.005	0.008
Quarto	399.592668	0.034	0.028	0.012	0.008	0.010
Quinto	799.185336	0.053	0.042	0.017	0.011	0.014
Sexto	1598.370672	0.071	0.064	0.034	0.021	0.025

Fonte: Aatoria Própria.

4.2 COEFICIENTES DE ADENSAMENTO

O Coeficiente de adensamento C_v reflete as características do solo (permeabilidade, porosidade e compressibilidade), e pode ser obtido a partir da realização de ensaio de adensamento aplicando-se os métodos usuais de Taylor ou Casagrande.

O método de Taylor foi o adotado neste trabalho, e ele consiste relacionar o tempo (“t”) necessário para completar 90% do adensamento primário.

O cálculo realizado para a obtenção do C_v é relativamente simples, como pode ser verificado na equação 4.1, sendo que a maior dificuldade está na determinação do valor de t_{90} . Para tanto são utilizados métodos próprios, que consistem basicamente em traçar gráficos a partir dos resultados do ensaio, como é ilustrado na Figura 4.7.

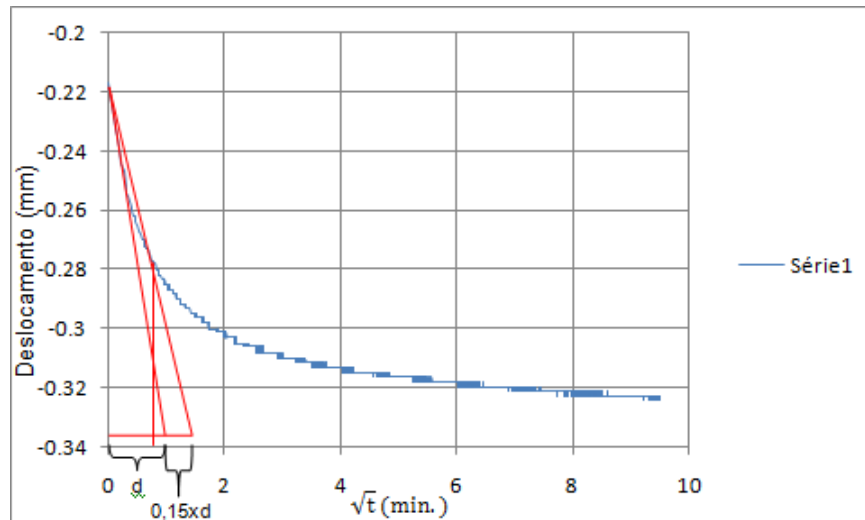


Figura 4.7 – Gráfico utilizado para obtenção do t_{90} .
Fonte: Autoria Própria.

Método de Taylor (raiz de t):

$$Cv_{90} = \frac{0,848.H^2}{t_{90}} \quad (\text{eq. 4.1})$$

Ao analisar os valores obtidos para os coeficientes de adensamento para cada amostra, é possível verificar que durante a tensão 49,95 kPa, o maior valor refere-se ao solo sem adição de cal, apresentando $8514,06 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e o menor valor é resultante do deslocamento ocorrido no ensaio de solo estabilizado com 6% de cal, cujo valor é igual a $282,67 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para a tensão de 99,90 kPa pertencente ao segundo carregamento, os coeficientes de adensamento máximo e mínimo são de $1177,78 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $31,76 \times 10^{-8}$, referentes aos materiais estabilizados com 3% de cal e com 8% de cal, respectivamente.

Durante o terceiro carregamento, cuja tensão aplicada é igual a 199,80 kPa, o maior e o menor coeficiente Cv_{90} foram de $99,53 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $403,81 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, para os solos contendo 6% de cal e 16% de cal respectivamente.

No quarto carregamento (tensão de 399,60 kPa), o maior Cv_{90} foi de $471,11 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para a amostra de solo sem adição de cal, e o menor Cv_{90} foi de $90,02 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para a amostra com 8% de adição de cal.

Os valores de Cv_{90} resultados durante o quinto carregamento (tensão de 799,20 kPa), variaram de $24,71 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para a amostra sem adição de cal a $193,61 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para a amostra de solo com 16% de cal.

Nas amostras em que foram aplicadas tensão igual a 1598,40 kPa, os coeficientes de adensamento Cv. 90 variaram de forma crescente de acordo com o aumento da adição de cal nas misturas. A variação de Cv. 90 é de $5,19 \times 10^{-8}$ m²/s para o solo sem adição de cal, até $193,61 \times 10^{-8}$ m²/s para o solo estabilizado com 16% de cal.

A tabela 4.2 apresenta todos os valores de Cv. 90 obtidos para as amostras estudadas.

Analisando os valores apresentados, verificou-se que os valores dos coeficientes Cv. 90 permaneceram mais estáveis nas amostras contendo 6% e 8% de cal, sendo que o solo estabilizado com 6% de cal apresentou por duas vezes os menores resultados de Cv. 90 quando comparado com as outras amostras (primeiro e terceiro carregamento).

Tabela 4.2 – Coeficiente de adensamento Cv. 90 para cada amostra de solo

Estágios de Carregamento	Pressão (kPa)	Cv. 90 ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)	Cv. 90 ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)	Cv. 90 ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)	Cv. 90 ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)	Cv. 90 ($\times 10^{-8}$) (m ² /s)
	*	Solo Sem Cal	Solo + 3%	Solo + 6%	Solo + 8%	Solo + 16%
Primeiro	49.95	8514,06	565,33	282,67	441,67	328,68
Segundo	99.90	403,81	1177,78	100,95	31,76	121,11
Terceiro	199.80	176,67	166,27	99,53	243,68	403,81
Quarto	399.59	471,11	227,96	210,95	90,02	371,93
Quinto	799.19	24,71	85,66	45,59	97,47	193,61
Sexto	1598.37	5,19	10,22	45,59	79,40	193,61

Fonte: Autoria Própria.

4.3 ANÁLISE DO ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados do ensaio de adensamento podem ser representados de diferentes formas. A curva de compressão do solo é normalmente representada em função do índice de vazios versus o logaritmo da tensão vertical.

A equação utilizada para encontrar o índice de vazios inicial e_0 é calculada segundo a equação 4.2

$$e_0 = \frac{\delta}{\gamma_s} - 1 \quad (\text{eq. 4.2})$$

Sendo:

δ = o peso específico dos grãos;

γ_s = o peso específico seco do material.

O índice de vazios referente ao final da etapa de carregamento e_f calcula-se de acordo com a equação 4.3.

$$e_f = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} \cdot (1 + e_0) \quad (\text{eq. 4.3})$$

Onde:

e_f = índice de vazios ao final do estágio de carregamento atual;

Δh = variação da altura do corpo de prova (acumulado) ao final do estágio;

h_0 = altura inicial do corpo de prova (antes do início do ensaio);

e_0 = índice de vazios inicial do corpo de prova (antes do início do ensaio).

Como é possível verificar na figura 4.8, o crescimento do índice de vazios acompanha o aumento do valor de cal adicionada ao solo, com exceção para a mistura contendo 8% de cal, a qual apresenta, até o quarto carregamento, índices de vazios superiores apenas ao do solo natural, fato que justifica o pequeno deslocamento da amostra.

Após o quarto carregamento é possível verificar que a redução no índice de vazios da amostra com 3% de cal passa a apresentar índice de vazios menores que a amostra contendo 8%.

Ao analisar as curvas de adensamento presentes nas figuras 4.1 até 4.6, observa-se que a amostra de solo misturada com 3% de cal começa a apresentar recalque inferior ao do solo natural exatamente a partir do quarto carregamento, momento em que o seu índice de vazios começa a aproximar-se mais do índice de vazios do solo natural.

Segundo a figura 4.8, a mistura de solo com 16% de cal apresentou os maiores índices de vazios, porém com a segunda menor variação do mesmo índice, seguida da amostra estabilizada com 8% de cal.

Ao observar os valores do peso específico aparente seco obtido pelo método da compactação por energia normal, presente na figura 3.1, é possível entender

esses fenômenos relacionados ao pequeno deslocamento vertical e ao baixo índice de vazios da amostra contendo 8% de cal, pois após uma sequência de quedas nos valores do peso específico aparente seco das amostras de solo natural, solo com 3% de cal e solo com 6% de cal, o solo misturado com 8% de cal apresenta um aumento no peso específico aparente seco, aproximando do valor do solo misturado com 3% de cal.

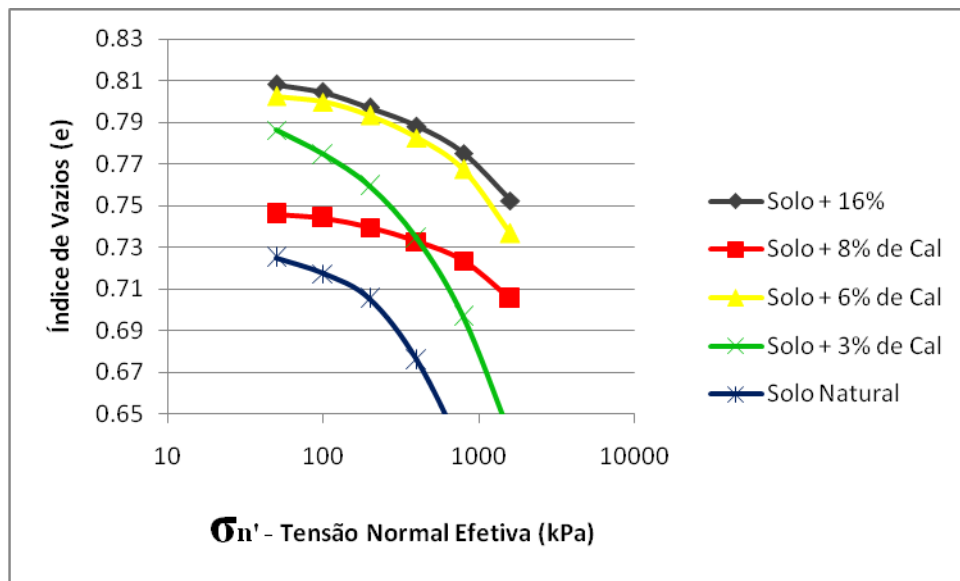


Figura 4.8 – Comparação entre os índices de vazios das amostras estudadas em função do logaritmo da pressão aplicada nas amostras.

Fonte: Autoria própria.

Os valores de índice de vazios de cada amostra para cada tensão aplicada é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Índice de vazios das misturas para cada tensão aplicada

Pressão (kPa)	Índice de Vazios	Índice de Vazios	Índice de Vazios	Índice de Vazios	Índice de Vazios
*	Solo Sem Cal	Solo + 3%	Solo + 6%	Solo + 8%	Solo + 16%
49.95	0.725	0.786	0.802	0.746	0.808
99.90	0.717	0.774	0.800	0.744	0.804
199.80	0.705	0.759	0.793	0.740	0.797
399.59	0.676	0.734	0.783	0.733	0.788
799.19	0.630	0.697	0.767	0.723	0.775
1598.37	0.569	0.639	0.737	0.705	0.752

Fonte: Autoria Própria.

Com a elaboração do gráfico com os valores de recalque adimensional ($\Delta h/H$), observa-se redução de recalque até o teor de 8%. No entanto, a curva em

que o solo continha 16% de cal apresentou recalque superior ao do material com 8%, com uma pequena diferença.

A análise realizada a partir das informações da figura 4.9, mostra que houve redução de recalque para o solo sem cal da ordem de um quarto com relação ao solo contendo 8% de cal, cujo recalque foi o menor entre todas as amostras testadas.

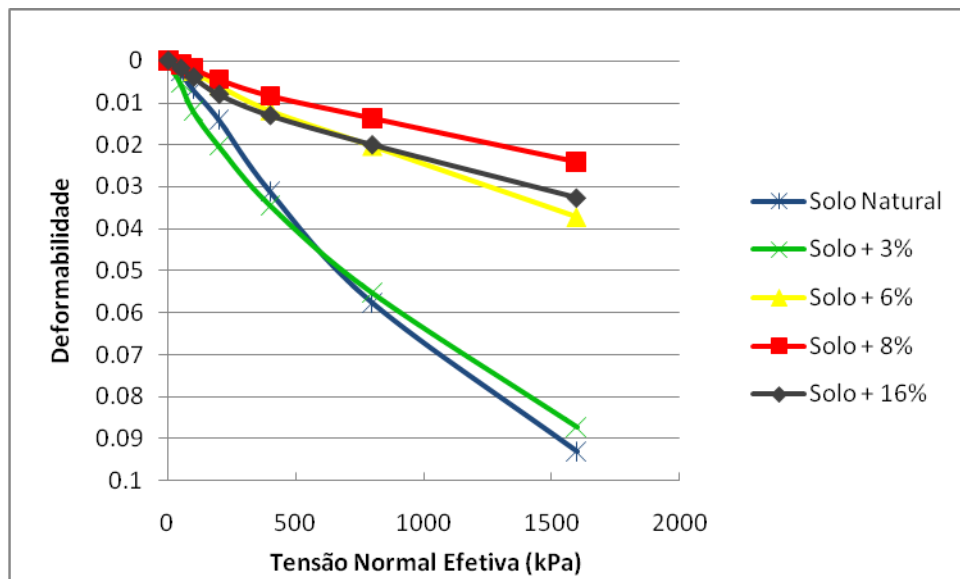
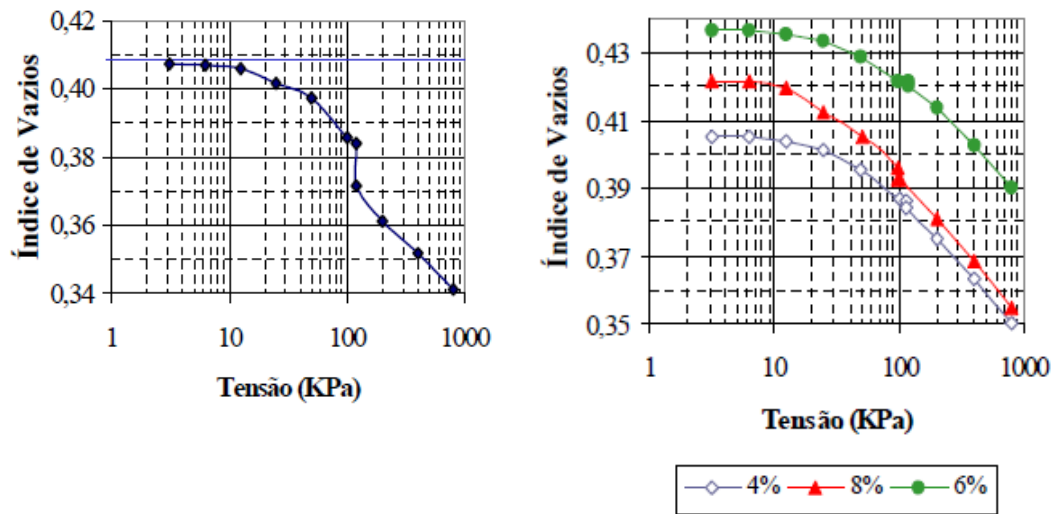


Figura 4.9 – Valores adimensionais de deformabilidade em função da tensão normal efetiva.
Fonte: Autoria própria.

Em um estudo feito com o objetivo de analisar a influência da adição de cal em um solo arenoso, da região de Bauru, em ensaios de resistência à compressão simples e colapsibilidade, Ide et al. (2005), realizaram ensaios de compressão oedométrica no respectivo solo sem adição de cal, e misturado com 4%, 6% e 8% de cal. De maneira semelhante ao comportamento das amostras pertencentes a Formação Guabirota, o solo da região de Bauru, caracterizado como areia pouco argilosa, também apresentou resultados referentes aos índices de vazios para o solo misturado com 8% de cal inferior ao da mistura de solo com 6% de cal, e ligeiramente superior aos valores de índice de vazios para o solo natural, como é possível observar na Figura 4.10. No entanto, ao analisar esses resultados, os autores desse trabalho verificaram que a amostra contendo 8% de cal apresenta grande tendência de ser colapsível.



(a)

(b)

Figura 4.10 – Curva de compressão oedométrica para o solo natural de Bauru; Curva de compressão oedométrica dos solos da região de Bauru misturados com cal.
 Fonte: Ide et al., 2005.

O fato do solo estabilizado com 8% de cal apresentar baixos índices de vazios, quando comparado com as outras amostras contendo cal, e o fato de a cal oferecer um ganho na capacidade de suporte em curto prazo, podem justificar o fato de a amostra ter apresentado valores menores de deslocamentos verticais ao ser solicitado por tensões normais, quando comparada com os outros materiais estudados.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa permite constatar que o uso da cal como material estabilizante do solo sedimentar da Formação Guabirotuba estudado, resultou na redução dos recalques por adensamento para os solos misturados com cal e sem tempo de cura.

A partir dos resultados apresentados foi possível verificar que a amostra contendo 8% de cal foi o material que apresentou os menores deslocamentos verticais em todas as tensões, oferecendo redução de até 76% dos recalques por adensamento quando comparado ao solo natural.

O baixo índice de vazios pode ser um dos fatores responsáveis pelo desempenho apresentado pelo solo contendo 8% de cal.

Já o solo contendo 3% de cal apresentou recalque superior ao do solo natural até o quarto carregamento (de acordo com Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), situação que pode ter ocorrido devido ao fato de a amostra conter uma quantidade de cal que não seria capaz ainda de promover melhora no desempenho do solo quanto a recalques por adensamento, porém foi suficiente para aumentar a trabalhabilidade do solo.

A amostra contendo o maior teor de cal, igual a 16%, apresentou recalques maiores do que os apresentados nos solos com 6% e 8% de cal, até o quarto carregamento, comportamento que pode ser explicado devido à grande quantidade de aglomerante. No entanto, a partir do quarto carregamento o solo contendo 16% de cal apresentou uma redução nos recalques devido ao ganho de resistência proporcionado pela cal, sendo seu deslocamento superior apenas ao do solo contendo 8% de cal (vide figuras 4.1, 4.2, 4.3, E 4.4).

Com relação ao coeficiente de adensamento C_v 90 os valores apresentados, permaneceram mais estáveis nas amostras contendo 6% e 8% de cal, sendo que o solo estabilizado com 6% de cal apresentou os menores valores durante o primeiro carregamento e durante o terceiro carregamento quando comparado com as demais amostras (Vide Tabela 4.1).

De acordo com o que foi exposto pode-se notar que pequenas adições da cal hidratada sobre o solo já garantem uma redução gradativa nos valores de recalque do solo, podendo desta forma se configurar uma alternativa interessante de melhoramento do solo quanto a recalques por adensamento. Desta forma o estudo realizado mostra que, se houver uma análise prévia do solo, o método de tratamento do solo utilizando cal apresenta potencial para o uso no desenvolvimento de obras

de aterros, rodovias, fundações rasas, radies, dentre outras atividades relacionadas com a construção civil, possibilitando a redução dos custos e do tempo de execução das obras, permitindo que se faça o uso do solo disponível no local onde será realizada a obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

_____. **NBR 12007**: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional, Rio de Janeiro, RJ, 1986. 13 p.

AZEVEDO, A. L. C.; JÚNIOR, A. O.; PEDROSA, R. A. A.; RAMALHO, R. W. **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais, n°. 2, p. 47-56. 1998.

BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. **Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature**. PCA R&D Serial N°. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 60 p., 2003.

BLIGHT, G. E.; LEONG, E. C. **Origin and Formation of Residual Soils**. In, **Mechanics of Residual Soils**. Ed. CRC press/Balkema. 2 ed. Isbn 978-0-415-62120-5, Rotterdam, 357 p., 2012.

BORDIGNON, V. R. **Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba**. Curitiba. UTFPR, 2015.

BRANDÃO, D. M.; LEITE, A. F.; JACINTHO, E. C.; GUIMARÃES, R. C. **Análise da Mistura Solo-Cal-Emulsão para Fins de Pavimentação Rodoviária**. I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, 2009.

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.

CAMPELLO, C. S.; MOURÃO, P. V.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R. **Estabilização com Cal da Mistura Solo-Revestimento Asfáltico Fresado**. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 2000. v.1, p.164-174.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através de Adição de Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga – Portugal, 2001.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificações dos Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 306p.

FELIPE, R. **S.Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. Curitiba: MINEROPAR, 2011 (1ª Edição).

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal seus Conceitos e suas Vantagens**. Boletim n°. 1 São Paulo: ABCP, 1971.

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

INGLÊS, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 374p., 1972.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. **Reactions Accompanying the Stabilization of Clay with Cement**. 42nd Annual Meeting of the HRB. Washington, USA. 1963.

JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso 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.

KORMANN, M.; CHRISTOPHER, A. **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.

LITTLE, D. N. **Stabilization of Pavement Subgrade and Base Course with Lime**, Published by Kendall/Hunt Publishing Company. 1995.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**, Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association, 1999.

LOPES JUNIOR, L. da S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2007.

LOVATO, RODRIGO S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

MERIGHI J. V. **Estruturas de Pavimento**. Escola de Engenharia Mackenzie. Curso: Estradas II. São Paulo, SP. 2004.

MOORE, R; MEYER, A. H.; ANDAY, M. C.; EMERY, J.J.; GUMM, J. H.; GRUTSCHICH, K. A.; HECKATHORN, C. W.; KENNEDY, T. W.; LANDRUM, H. W.; LITTLE, D. N.; MCDONALD, E. B.; ORMSBY, W. C.; PETRY, T. M.; THOMPSON, M. R.; USMEN, M. A.; WRIGHT, P. J. **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design, and construction**. TransportationResearchBoard. Washington, 1987.

NASCIMENTO, N. A.; CHAMECKI, P. R.; RUSSO NETO, L.; MERCURI, A. **Estudo Paramétrico Preliminar dos Solos Sedimentares Característicos da Bacia de Curitiba**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., Foz do Iguaçu, 1994. Anais. s.L: ABMS, 1994. v.4, p. 1277-1284.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. **Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas**. São Paulo, SP, 2000.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.; CINCERRE, J. R.; NETO, A. Z.; SERRA, P. R. M. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. Bases Alternativas com Solos Lateríticos, Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. Ed. Arte & Ciência, 2 ed. – Ampliada. São Paulo, SP, 2009. 196 p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 1991.

POMATTI, K. E. **Estabilização do Solo da Região de São Pedro de Alcântara-SC com Cal Visando o Seu Emprego na Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2000.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement of Stabilization**. In: Transportation Research Record. 79th Annual Meeting, 2000, Washington, D.C.

SALAMUNI, E. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. 1998. 214p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociência e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro.

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.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 1994.

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