

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

THAYNARA DE SOUSA COSTA

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO SUPERFICIAL E LATERÍTICO DE
CASCABEL-PR DEVIDO AO MELHORAMENTO COM ADIÇÃO DE CAL E
CIMENTO**

**CASCABEL - PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

THAYNARA DE SOUSA COSTA

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO SUPERFICIAL E LATERÍTICO DE
CASCABEL-PR DEVIDO AO MELHORAMENTO COM ADIÇÃO DE CAL E
CIMENTO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Mestre Engenheiro Civil
Maycon André de Almeida**

**CASCABEL - PR
2018**

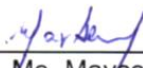
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

THAYNARA DE SOUSA COSTA

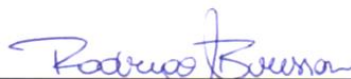
**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO SUPERFICIAL E LATERÍTICO DE
CASCAVEL-PR DEVIDO AO MELHORAMENTO COM ADIÇÃO DE CAL E
CIMENTO**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Mestre Engenheiro Civil Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Me. Maycon André de Almeida
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil



Professor Esp. Rodrigo Techio Bressan
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenharia Civil



Professor Me. Guilherme Irineu Venson
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE
Engenheiro Civil

Cascavel, 06 de dezembro de 2018.

Dedico este trabalho a minha avó materna, Ivone (*in memoriam*), por ser meu maior exemplo de mulher e sempre me incentivar a acreditar e ir atrás dos meus sonhos. E aos meus pais, Edna e José Carlos, por todo amor e apoio ao longo de todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre foi o meu socorro nas horas de desespero, respondendo sempre com amor e cuidado às minhas orações.

Aos meus pais, Edna e José Carlos, que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui, por todo amor, incentivo e apoio que me deram ao longo de todos esses anos de formação e pela ajuda direta na realização dos ensaios deste trabalho.

Ao meu irmão, Carlos Eduardo, que entendeu a minha ausência algumas vezes ao longo da minha graduação, acompanhou a minha dedicação e torceu por mim.

Ao meu orientador, Maycon, por toda sua atenção, dedicação e esforço para que eu pudesse ter confiança e segurança na realização deste trabalho.

Aos meus familiares, que sempre confiaram em meu potencial e me incentivaram com palavras de ânimo e orações. Em especial a minha afilhada, Rafaela, que atendeu prontamente ao meu pedido de ajuda, auxiliando-me na realização dos ensaios para elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho, agradeço pelos inúmeros conselhos, frases de motivação e os momentos de descontração. Em especial à amiga Louisa, que dedicou-se à correção deste trabalho e ao meu chefe, Tiago, que compreendeu a todas as vezes que precisei me ausentar do trabalho durante o período do TCC.

À equipe de profissionais responsáveis pelos laboratórios do curso de Engenharia Civil desta instituição, que me auxiliaram com os equipamentos e estiveram sempre prontos para ajudar. Em especial ao laboratorista e agora grande amigo Jhonatan, que me acompanhou e auxiliou em todas as etapas da elaboração deste estudo.

À empresa Solitec Fundações, em especial o funcionário Juliano, que me auxiliou na coleta das amostras de solo para desenvolvimento desse estudo.

A esta instituição de ensino que me proporcionou um ensino de qualidade e excelência. Sou grata a cada membro do corpo docente, à direção e a administração deste Centro Universitário.

Muito obrigada a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho.

RESUMO

O melhoramento de um solo consiste no emprego de alguma técnica de natureza química, física ou mecânica que busque alterar determinadas propriedades e características deste solo. O objetivo do presente estudo foi analisar a variação da permeabilidade do solo laterítico e superficial da cidade de Cascavel-Pr devido ao melhoramento com adição de cal e cimento, através de um método direto de determinação da permeabilidade. As amostras de solo utilizadas para análise foram coletadas do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEf) e posteriormente conduzidas ao laboratório de Mecânica do Solos do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, onde passaram por processo de destorroamento, peneiramento e secagem em estufa. Com as amostras de solo devidamente preparadas, além da porção utilizada para análise do solo compactado sem aditivos, foram incorporados a estas dois diferentes estabilizantes, a cal e o cimento, em três diferentes teores: 10%, 15% e 20% em massa. Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado o método de compactação de *Proctor*, utilizando os níveis de energia normal e modificada, respeitando para cada uma delas a respectiva umidade ótima de compactação. Foram moldados quatorze diferentes corpos de prova, obedecendo a cada conjunto de condições: tipo de aditivo x teor de aditivo x energia de compactação. Os corpos de prova permaneceram em processo de cura por sete dias e após este período foram submetidos ao ensaio de permeabilidade à carga variável conforme o Método B da NBR 14545/2000. Os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos para as misturas de solo-cimento mostraram-se satisfatórios ao serem comparados aos valores obtidos para o solo in natura, apresentando melhor resultado para a amostra que continha 15% de cimento e fora compactada na energia de *Proctor* modificada. Já as amostras de solo-cal apresentaram problemas durante a execução dos ensaios, resultando em coeficientes da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} , valor este muito acima dos valores estabelecidos na literatura até mesmo para solos argilosos que não sofreram estabilização.

Palavras-chave: Permeabilidade de solos. Estabilização de solos. Energia de compactação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de compressão edométrica de um solo colapsível.....	20
Figura 2: Dimensões dos cilindros de <i>Proctor</i>	22
Figura 3: Dimensões dos soquetes.....	22
Figura 4: Permeâmetro NBR 13292.	27
Figura 5: Aparelhagem utilizada no Método A da NBR 14545.	28
Figura 6: Equipamento utilizado no Método B da NBR 14545.	29
Figura 7: Resultados do ensaio de compressão axial para amostras de solo-cal.....	34
Figura 8: Relação tensão x deformação CP com 5% de cimento.....	36
Figura 9: Relação tensão x deformação CP com 20% de cimento.....	36
Figura 10: Local de coleta de amostras.	38
Figura 11: Curvas granulométricas do solo do CEEF com e sem a influência de defloculante.	39
Figura 12: Curvas de compactação do solo superficial do CEEF.	40
Figura 13: Coleta e preparação de amostras.....	41
Figura 14: Materiais dosados para mistura.....	44
Figura 15: Moldagem do corpo de prova.	44
Figura 16: Amostra extraída e isolada para cura.	44
Figura 17: Permeâmetro do método B e bureta graduada.	46
Figura 18: Aferição das dimensões e corpo de prova parafinado.....	47
Figura 19: Preparação da base do permeâmetro.....	48
Figura 20: Aplicação da argila bentonítica e montagem do permeâmetro.	49
Figura 22: Permeâmetro acoplado ao sistema de aplicação e medição das cargas hidráulicas.	50
Figura 23: Resultados obtidos para as misturas de solo-cimento.....	53
Figura 24: Resultados obtidos para as misturas de solo – cal.	54
Figura 25: Soerguimento do corpo de prova.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação granulométrica de acordo com a ABNT.	17
Tabela 2: Características inerentes à energia de compactação.	23
Tabela 3: Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.	24
Tabela 4: Coeficientes de permeabilidade do solo de Cascavel – PR.	30
Tabela 5: Determinação dos teores de cal a serem adicionados ao solo.	33
Tabela 6: Valores médios do solo.....	39
Tabela 7: Valores do ponto ótimo de compactação.....	40
Tabela 8: Características inerentes à compactação.....	42
Tabela 9: Características de moldagem.	43

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação para determinação do coeficiente de permeabilidade do solo.....	25
Equação 2: Equação de Piseuille.....	25
Equação 3: Equação de Kozeny-Carman.	25
Equação 4: Equação da Energia de Compactação por unidade de volume.....	41
Equação 5: Equação do coeficiente de permeabilidade através de cargas hidráulicas.....	51

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1.1 INTRODUÇÃO	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE.....	14
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	14
CAPÍTULO 2	16
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.1 Solo.....	16
2.1.1.1 Partículas que compõem o solo e faixas granulométricas	16
2.1.1.2 Tipos de solo	18
2.1.1.2.1 Solo residual	18
2.1.1.2.2 Solo laterítico	19
2.1.1.2.3 Solo colapsível	20
2.1.2 Ensaio de compactação <i>Proctor</i> e energia de compactação	21
2.1.3 Permeabilidade	23
2.1.3.1 Coeficiente de permeabilidade	23
2.1.3.2 Fatores que influenciam na permeabilidade do solo	24
2.1.3.3 Determinação matemática do coeficiente de permeabilidade	25
2.1.3.4 Ensaios de determinação da permeabilidade	26
2.1.3.4.1 Permeabilidade à carga constate.....	26
2.1.3.4.2 Permeabilidade à carga variável	27
2.1.3.4.3 Permeabilidade <i>in situ</i>	29
2.1.3.5 Estudos anteriores sobre a permeabilidade do solo de Cascavel	30
2.1.4 Estabilização e melhoramento do solo	31
2.1.5 Cal.....	32
2.1.5.1 Melhoramento do solo com adição de cal	32
2.1.5.2 Estudos anteriores com aplicação de cal ao solo de Cascavel	33
2.1.6 Cimento	34

2.1.6.1 Melhoramento do solo com adição de cimento	34
2.1.6.2 Estudos anteriores com aplicação de cimento ao solo de Cascavel	35
CAPÍTULO 3	37
3.1 METODOLOGIA	37
3.1.1 Tipo de estudo	37
3.1.2 Localização da área de estudo	37
3.1.3 Caracterização do solo local	38
3.1.4 Coleta e preparação das amostras de solo	40
3.1.5 Moldagem dos corpos de prova.....	41
3.1.5.1 Tempo de cura	44
3.1.6 Ensaio de permeabilidade.....	45
3.1.6.1 Equipamentos e materiais utilizados	45
3.1.6.2 Procedimento do ensaio.....	46
3.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	51
CAPÍTULO 4.....	52
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1.1 Solo - cimento.....	52
4.1.2 Solo - cal.....	54
CAPÍTULO 5	57
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
CAPÍTULO 6.....	59
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS.....	60

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Em meio a tantos fatores envolvidos na concepção de uma obra de Engenharia Civil, o solo deve ser um dos principais objetos de estudo. Pinto (2006) ressalta a importância do solo quando diz que é sobre ele que assentam-se todas as obras, sendo assim imprescindível o conhecimento de suas características, propriedades e comportamentos para considerações de cálculo e dimensionamento, garantindo a eficiência do empreendimento.

Dentre as propriedades do solo que devem ser consideradas previamente, a permeabilidade merece uma atenção especial, quantificada através do coeficiente de permeabilidade do solo, ela expressa a taxa de infiltração de um fluido em um meio poroso, sendo definida de acordo com Caputo (1988), como a propriedade que o solo apresenta de permitir a percolação da água através dele, podendo interferir diretamente em outras propriedades importantes.

Para determinados tipos de solos, Silva (2007) destaca que, devido às características de baixa resistência que não atendem de maneira satisfatória a determinadas solicitações de projeto, surge a necessidade de alterar suas propriedades, sendo a estabilização ou melhoramento do solo uma das alternativas empregadas para viabilizar estas alterações.

Estabilização do solo, segundo Silva (2007), compreende todas as formas de melhoria das propriedades do solo, sejam elas naturais ou artificiais, cujo objetivo é garantir a constância destas características durante o tempo de vida útil das obras de engenharia. Variações relacionadas ao aumento da resistência, rigidez, durabilidade, deformabilidade e permeabilidade são esperadas do processo de estabilização.

Neste sentido, o presente estudo busca analisar, através de ensaios de laboratório, como a incorporação de agentes estabilizantes como cal e cimento afetam a permeabilidade do solo laterítico superficial de Cascavel – PR.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da adição de cimento e de cal, nos teores de 10%, 15% e 20% na permeabilidade de uma amostra de solo laterítico superficial, característico da cidade de Cascavel-PR.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar os coeficientes de permeabilidade das amostras de solo sem aditivo e referentes a cada dosagem de mistura de solo-cimento e solo-cal através de ensaios de permeabilidade à carga variável;
- Comparar os resultados obtidos para as misturas de solo-cimento e solo-cal com os resultados das amostras compactadas sem aditivos e a estudos anteriores realizados por Silva (2016) e Falkowski (2016) para o solo no estado *in natura*.

1.3 JUSTIFICATIVA

Durante o processo de urbanização do território, muitas vezes, tem-se a necessidade de construir sobre um solo cujas características físicas e mecânicas não são coniventes às solicitações de projeto, a ocupação de áreas cujo solo é considerado de baixa resistência é fato irrevogável em relação ao processo de crescimento urbano, sendo preciso encontrar alternativas que o tornem mais resistentes e correspondentes às mais diversas solicitações.

Neste sentido, diversas literaturas indicam a estabilização do solo como alternativa que surge a fim de alterar diversas características desse material, tornando-o mais atrativo com relação à capacidade de carga, permeabilidade, plasticidade, entre outros.

Na engenharia, conforme Brito e Paranhos (2017), este processo pode ser um grande aliado quando se trata da construção de estradas, rodovias e de pistas de aeroportos, melhorando a resistência e a capacidade de suporte do solo. A estabilização do solo também é

aplicada durante a construção de barreiras e aterros, onde o processo visa a redução da permeabilidade do solo.

A utilização de técnicas de estabilização, quando empregadas de maneira correta, leva à redução no tempo de execução da obra, viabiliza a industrialização do processo construtivo, garante melhor controle do comportamento da obra e ainda proporciona uma considerável economia para o empreendimento, mesmo que a longo prazo.

As vantagens da estabilização do solo vão desde o desenvolvimento de novas tecnologias, até questões que envolvem o meio ambiente e a economia da obra. São essas, algumas das razões que fazem com que este processo seja cada vez mais empregado em obras de pavimentação de baixo custo e impermeabilização de aterros.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A incorporação de cal e de cimento provoca alterações significativas no coeficiente de permeabilidade do solo de Cascavel – PR?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Os diferentes processos de estabilização do solo visam modificar as características do sistema solo-água-ar, a fim de obter melhor resistência à deformação e ao deslocamento. De acordo com Makusa (2013) e Medina (1987) *apud* Brito e Paranhos (2017), a adição de estabilizadores ao solo natural ajuda a promover o preenchimento dos poros, assegurando a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa ficou limitada a comparar os resultados obtidos através dos ensaios de permeabilidade realizados em laboratório para as misturas de solo-cimento e solo-cal com resultados de estudos anteriores, realizados com o solo *in natura*, e identificar possíveis variações em seus coeficientes de permeabilidade.

As amostras de solo foram extraídas do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), no município de Cascavel – PR e os corpos de prova foram moldados considerando cada conjunto de condições: tipo de aditivo x teor de aditivo x energia de compactação.

O procedimento para o ensaio de determinação da permeabilidade do solo foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz seguindo as especificações contidas no Método B da NBR 14545/2000.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas informações que garantirão um melhor entendimento do estudo realizado. Serão apresentadas definições de solo, tipos de solo, permeabilidade e fatores que a afetam, estabilização de solos, e demais informações que se fazem necessárias para o embasamento da pesquisa.

2.1.1 Solo

No contexto geotécnico, Lollo *et al.* (2008) dizem que o solo pode ser definido como o material resultante da desagregação das rochas, apresentando um índice de vazios maior do que o da rocha que o originou. O solo é formado por um conjunto de partículas sólidas, água e ar. Normalmente é a fase sólida que irá caracterizá-lo, podendo variar em sua forma e tamanho e seus poros são preenchidos por materiais na fase líquida e ar.

Segundo Caputo (1988), os solos são materiais resultantes do intemperismo das rochas, através da desintegração mecânica ou decomposição química destas. Pinto (2006) destaca que essas rochas constituíam inicialmente a crosta terrestre e após sofrerem a ação de agentes físicos e químicos, tais como mudança de temperatura, ação da água, da vegetação e do vento, por exemplo, acabaram se decompondo e dando origem ao solo.

Na Engenharia Civil, o solo é considerado um elemento de extrema importância, tendo visto que, de acordo com Pinto (2006), todas as obras assentam-se sobre o terreno sendo inevitável o conhecimento de suas características e comportamento para considerações de cálculo e dimensionamento.

2.1.1.1 Partículas que compõem o solo e faixas granulométricas

De acordo com Pinto (2006), o processo de intemperismo sofrido pelas rochas que constituíam a crosta terrestre resultou em misturas de partículas pequenas distintas entre si

pelo tamanho e pela composição química, que carregam consigo traços e características similares aos da rocha que lhes deu origem.

Segundo Caputo (1988), o solo é constituído por grãos minerais, podendo conter também matéria orgânica. Minerais são substâncias inorgânicas e naturais com composição química e estrutura definida. Os minerais encontrados no solo podem ser tanto aqueles da rocha que originou esse solo, como podem ser minerais formados durante o processo de decomposição.

Para Pinto (2006), o tamanho das partículas constituintes é a primeira característica que diferencia os solos. A Tabela 1 mostra os valores limites para cada faixa granulométrica definidos pela NBR 6502/1995.

Tabela 1: Classificação granulométrica de acordo com a ABNT.

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	200,00 mm a 1,00 m
Pedra	60,00 mm a 200,00 mm
Pedregulho grosso	20,00 mm a 60,00 mm
Pedregulho médio	6,00 mm a 20,00 mm
Pedregulho fino	2,00 mm a 6,00 mm
Areia grossa	0,60 mm a 2,00 mm
Areia média	0,20 mm a 0,60 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,20 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: ABNT (1995).

No que se refere a composição química, os minerais que compõem os solos grossos são agrupados em silicatos, óxidos, carbonatos e sulfatos. Dentre estes, o grupo dos silicatos é tido como o mais importante. Os principais integrantes desse grupo são os feldspatos, as micas e o quartzo.

Os feldspatos são os minerais mais atacados pela natureza e dão origem aos argilominerais, que constituem a fração mais fina dos solos. Já as micas apresentam como principais características a clivagem fácil, que permite sua separação em lâminas muito finas e a flexibilidade. O quartzo por sua vez, é o mineral mais importante do grupo dos silicatos, é bastante resistente à desagregação e forma grãos de siltes e areias.

Para os solos finos, a composição química é um pouco mais complexa. A análise das argilas revela que sua constituição é basicamente de quartzo em forma coloidal e de sesquióxidos metálicos de alumínio e de ferro. Caputo (1988) ainda expõe que as argilas são constituídas de pequeníssimos minerais cristalinos, chamados minerais argílicos que se dividem em três grupos principais: caolinitas, montmorilonitas e ilitas.

As argilas formadas pelas caolinitas possuem uma estrutura rígida e são relativamente estáveis em presença da água. As montmorilonitas resultam em argilas muito expansíveis, instáveis na presença da água. Estruturalmente análoga a esta última, temos as argilas formadas pelas ilitas, que são menos expansivas.

2.1.1.2 Tipos de solo

Os tipos de solo podem ser classificados levando em consideração diferentes parâmetros como origem e formação do solo e granulometria das partículas que o constitui. De acordo com a granulometria, os solos podem ser classificados em grossos ou finos. Os solos grossos são aqueles cuja maior porção é formada por pedregulhos e areias. Já os solos finos apresentam sua maior porção formada por grãos de areia e silte.

Quanto a formação e origem, os solos podem ser residuais, sedimentares ou de formação orgânica. Os solos residuais caracterizam-se por permanecer na mesma região onde se encontra sua rocha mãe. Já os solos sedimentares são os chamados solos transportados, uma vez que não possuem as características da rocha local e foram ali depositados devido a ação de algum agente transportador. Solos de formação orgânica são aqueles encontrados na superfície e são originados de material orgânico de origem vegetal ou animal.

2.1.1.2.1 Solo residual

Lollo *et al.* (2008) apontam que a classificação genética geral identifica os solos em função de sua formação, baseado em fatores como: a natureza da rocha de origem, agente de transporte, processos orgânicos, e clima e relevo característicos da região. É imprescindível conhecer a origem dos solos para uma melhor compreensão das características e parâmetros obtidos para eles.

Caputo (1988) define solos residuais como aqueles que permanecem no local da rocha de origem, ou seja, carregam consigo características mineralógicas muito semelhantes às da rocha local. Lollo *et al.* (2008) ressaltam que os perfis residuais têm sua textura controlada por sua rocha matriz e pela intensidade dos processos intempéricos aos quais estiveram sujeitos.

Para ocorrência desse tipo de solo, Pinto (2006) destaca que é necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior que a velocidade de remoção das partículas por agentes externos. Essa velocidade de decomposição está relacionada a alguns fatores como temperatura, tipo de vegetação e regime de chuvas.

Segundo Pinto (2006), é de grande interesse a indicação da rocha mãe dos solos residuais, pois é ela quem condiciona a composição física do solo. Solos residuais de basalto, por exemplo, são predominantemente argilosos.

Para Caputo (1988), dentre os solos residuais, merecem destaque os solos lateríticos, os expansivos e os solos colapsíveis. Mais informações a respeito dos solos lateríticos e dos colapsíveis serão abordados na sequência.

2.1.1.2.2 Solo laterítico

De acordo com Araujo e Dantas Neto (2014), os solos lateríticos são típicos de regiões de clima tropical úmido, como é o caso de boa parte do território brasileiro, e apresentam uma composição mineralógica diferenciada devido às condições geológicas de sua formação.

Pinto (2006) destaca que os solos lateríticos possuem significativas parcelas de minerais cauliníticos e altas concentrações de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em sua fração de argila. As altas taxas de ferro e alumínio são responsáveis por uma característica muito particular desse tipo de solo, que é sua coloração avermelhada.

Esse tipo de solo é resultante de um intenso processo de intemperismo, sendo composto essencialmente por partículas de argila e siltes. Pinto (2006) explica que os solos lateríticos são geralmente encontrados na natureza na forma não saturada, fato que lhe confere uma pequena capacidade de suporte devido ao seu elevado índice de vazios. Ao ser compactado, esse solo adquire uma maior capacidade de suporte, apresentando contração quando o teor de umidade diminui, porém não se expandindo quando esse teor é aumentado.

2.1.1.2.3 Solo colapsível

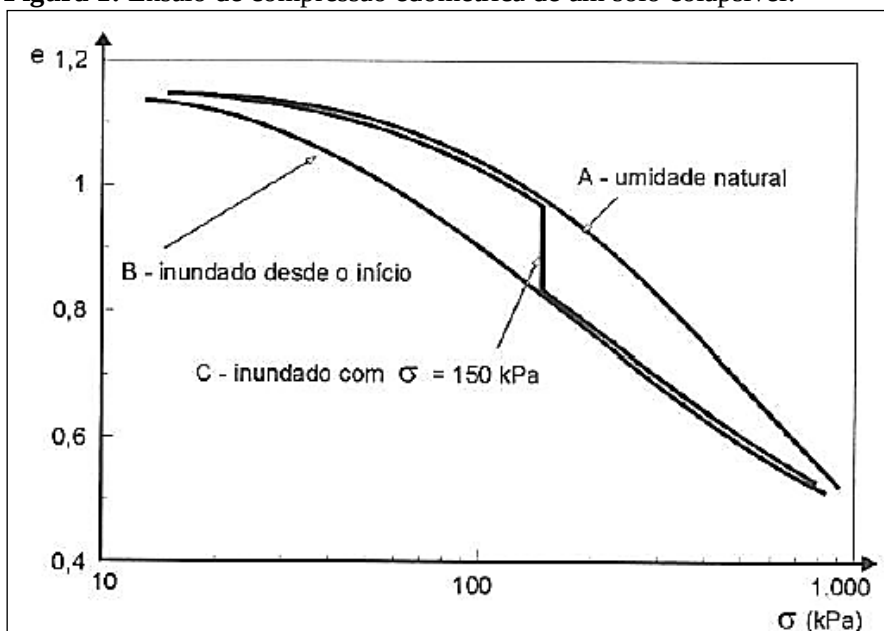
Solos colapsíveis, de acordo com Pinto (2006), são solos não saturados que apresentam significativa e célere compressão quando ocorre um aumento de sua umidade, mesmo que a tensão total atuante se mantenha inalterada.

Lollo *et al.* (2008) apontam que neste tipo de perfil, a lixiviação das camadas mais superficiais gera camadas com elevada porosidade e baixa massa específica, ocasionando a estrutura potencialmente colapsível do solo.

Vargas (1978) e Collares (1997) atribuem à água da chuva a responsabilidade pela lixiviação dos óxidos de ferro e frações finas das camadas superficiais para as camadas subjacentes, tornando as camadas superiores mais porosas e instáveis, enquanto as camadas subjacentes tornam-se mais rijas.

Para Pinto (2006), o colapso deve-se à destruição dos meniscos capilares, responsáveis pela tensão de sucção, ou ao amolecimento do cimento natural, responsável por manter as partículas e as agregações destas, unidas. A Figura 1 mostra os resultados de um ensaio de compressão edométrica de um solo colapsível.

Figura 1: Ensaio de compressão edométrica de um solo colapsível.



Fonte: PINTO (2006)

A curva A representa os resultados obtidos para uma amostra de solo colapsível cujo teor de umidade inicial fora mantido; já o corpo de prova que resultou na curva B fora previamente saturado; a curva C foi traçada para um corpo de prova inicialmente com sua

umidade natural, mas que ao atingir uma tensão de 150 kPa, foi inundado, apresentando significativa redução em seu índice de vazios.

Para a ocorrência do colapso, Collares (1997) aponta a necessidade de uma estrutura com elevada porosidade, cujas partículas estejam em uma situação de equilíbrio metaestável. Forças eletromagnéticas de superfície, a sucção e a presença de agentes cimentantes, como óxidos de ferro e carbonatos, mantém essa estrutura conferindo a ela uma resistência temporária que é interrompida quando submetida a alguma perturbação.

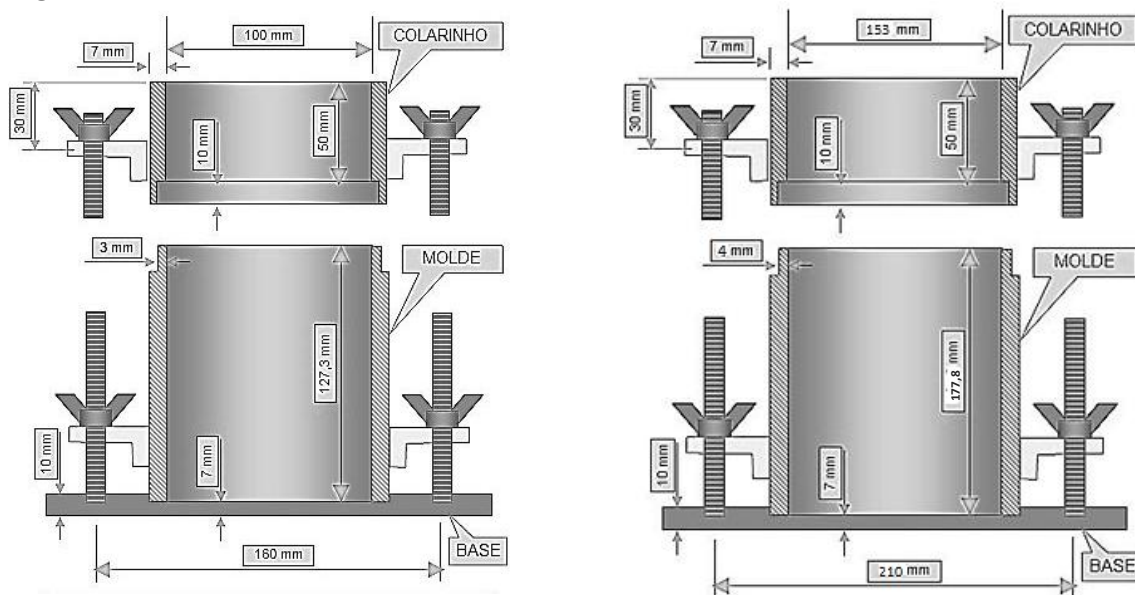
2.1.2 Ensaio de compactação *Proctor* e energia de compactação

O Ensaio de Compactação de *Proctor* é regido no Brasil pelas diretrizes da norma NBR 7182/2016. Esse ensaio consiste na aplicação de uma energia de compactação ao solo, provocando a expulsão do ar presente nos vazios deste. Há, para cada energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica máxima, ou uma densidade máxima.

A aplicação da energia de compactação é realizada através de golpes, que são dados com o soquete, às camadas de solo que preenchem um cilindro metálico. São três os níveis de energia: normal, intermediária e modificada. A energia de compactação normal é arredondada para 600 kN.m/m³, enquanto para a energia modificada é estimada em 2800 kN.m/m³.

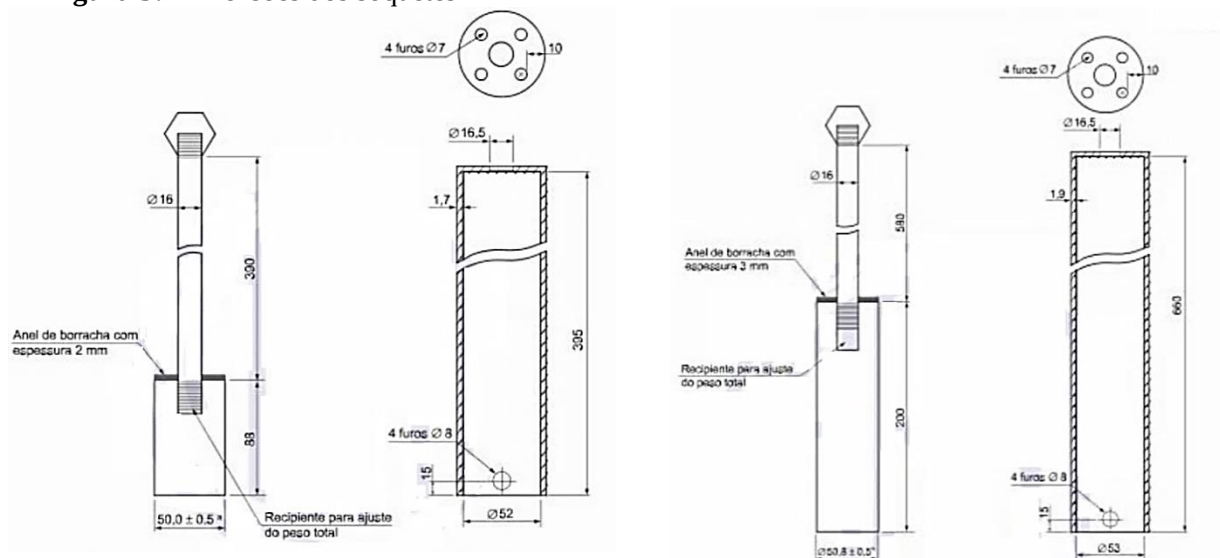
Os soquetes e cilindros utilizados no ensaio possuem dimensões estabelecidas pela norma NBR 7182/2016, conforme Figuras 2 e 3.

Figura 2: Dimensões dos cilindros de *Proctor*.



Fonte: Watanabe (2014).

Figura 3: Dimensões dos soquetes



Fonte: ABNT (2016).

Para cada energia de compactação a NBR 7182/2016 especifica os equipamentos a serem utilizados, o número de camadas e o número de golpes para cada camada. A Tabela 2 apresenta as características inerentes a cada energia.

O Ensaio de Compactação de *Proctor* é adotado para determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca dos solos. Além disso, o método de ensaio é utilizado para moldagem de corpos de prova para realização de outros ensaios, como CBR, compressão simples e pereabilidade.

Tabela 2: Características inerentes à energia de compactação.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de Camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT (2016).

2.1.3 Permeabilidade

Permeabilidade do solo pode ser definida, de acordo com Rodriguez *et al.* (2015), como a propriedade que avalia a facilidade de percolação da água através de seus poros vazios. Essa facilidade é quantificada através do chamado coeficiente de permeabilidade, expresso em unidade de distância por unidade de tempo.

De acordo com Martins *et al.* (2002), a permeabilidade do solo é um dos indicadores mais importantes da qualidade do solo. Alonso (1999) assegura que a permeabilidade descreve a facilidade que os solos oferecem à passagem de água.

Conforme Caputo (1988), conhecer a permeabilidade de um solo é de extrema importância para a engenharia, principalmente quando relacionada à drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamentos, estimativa da vazão, barragens de terra, entre outros.

Das (2011) expõe que os solos são permeáveis devido à existência de vazios interconectados pelos quais a água pode fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia.

2.1.3.1 Coeficiente de permeabilidade

Stephens (1996) *apud* Mahler e Aguiar (2001), apresenta o coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica, (k), como a taxa de infiltração de um fluido em um meio poroso. Na zona não saturada do solo, este coeficiente varia em função das propriedades do meio poroso, das características do fluido e do teor de umidade volumétrica

do material. Assim, quanto maior a umidade, maior será a condutividade hidráulica, pois a área útil condutora de água vai diminuindo à medida que o teor de água também diminui. Já para a zona saturada do solo, a variação do coeficiente de permeabilidade é devida apenas às propriedades do meio poroso e das características do fluido.

Segundo Neves (1987), o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado através de diferentes maneiras: fórmulas empíricas, ensaios em laboratórios, ou ensaios *in situ*.

De acordo com Pinto (2006), o coeficiente de permeabilidade do solo é tanto menor quanto menor os vazios desse solo. Os vazios do solo variam de acordo com as suas partículas constituintes. A Tabela 3 apresenta valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares.

Tabela 3: Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.

Tipo solo	k
Argilas	$< 10^{-9}$ m/s
Siltes	10^{-6} a 10^{-9} m/s
Areias argilosas	10^{-7} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s

Fonte: Pinto (2006).

2.1.3.2 Fatores que influenciam na permeabilidade do solo

Para Mesquita (2001), a granulometria e a estrutura apresentam influência sobre o espaço poroso do solo, sua porosidade total e na distribuição de poros, dificultando em diferentes intensidades, o movimento da água.

Caputo (1988), por sua vez, destaca que solos diferentes possuem diferentes coeficientes de permeabilidade, mas se tratando de um mesmo tipo de solo, a variação da condução hidráulica deve-se essencialmente à temperatura e ao índice de vazios.

A variação da temperatura afeta a viscosidade da água, causando uma relação inversamente proporcional entre o coeficiente de permeabilidade e a viscosidade. Já com relação ao índice de vazios (e), o comportamento apresentado é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior for (e), maior será o coeficiente (k).

De acordo com Pinto (2006), os coeficientes de permeabilidade são diretamente proporcionais aos vazios nos solos e ao tamanho de suas partículas, ou seja, quanto menores as partículas de determinado solo, menor será o índice de vazios desse solo, e consequentemente, seu coeficiente de permeabilidade também será reduzido.

2.1.3.3 Determinação matemática do coeficiente de permeabilidade

Existe mais de uma equação que permite calcular o coeficiente de permeabilidade do solo. A Equação 1 leva em consideração a Lei Experimental de Darcy, que diz que a velocidade de percolação da água é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico.

$$k = \frac{v}{i} \quad (1)$$

Onde,

k é o coeficiente de permeabilidade, expresso em cm/s;

v é a velocidade média aparente de escoamento da água através da área total da seção transversal do solo;

i é o gradiente hidráulico, adotado como 1.

Existem ainda equações que relacionam propriedades e índices físicos do solo para a determinação do coeficiente de permeabilidade. As Equações 2 e 3 apresentam respectivamente as equações propostas por Poiseuille e Kozeny-Carman. A Equação 2 é aplicada a escoamentos capilares. Já a Equação 3 é utilizada para a caracterização da permeabilidade em meios porosos.

$$k = C \times D^2 \times \frac{\gamma \times e^3}{(\mu_1 + e)} \quad (2)$$

$$k = \frac{1 \times \gamma \times e^3}{k_0 \times S^2 \times (\mu_1 + e)} \quad (3)$$

Onde,

k é o coeficiente de permeabilidade;

C é o fator de forma;

D é o diâmetro específico das partículas;

γ é o peso específico do fluido;

μ é a viscosidade do fluido;

e é o índice de vazios do solo;

k_0 é um fator que depende da forma dos poros e da trajetória da linha de fluxo;

S é a superfície específica;

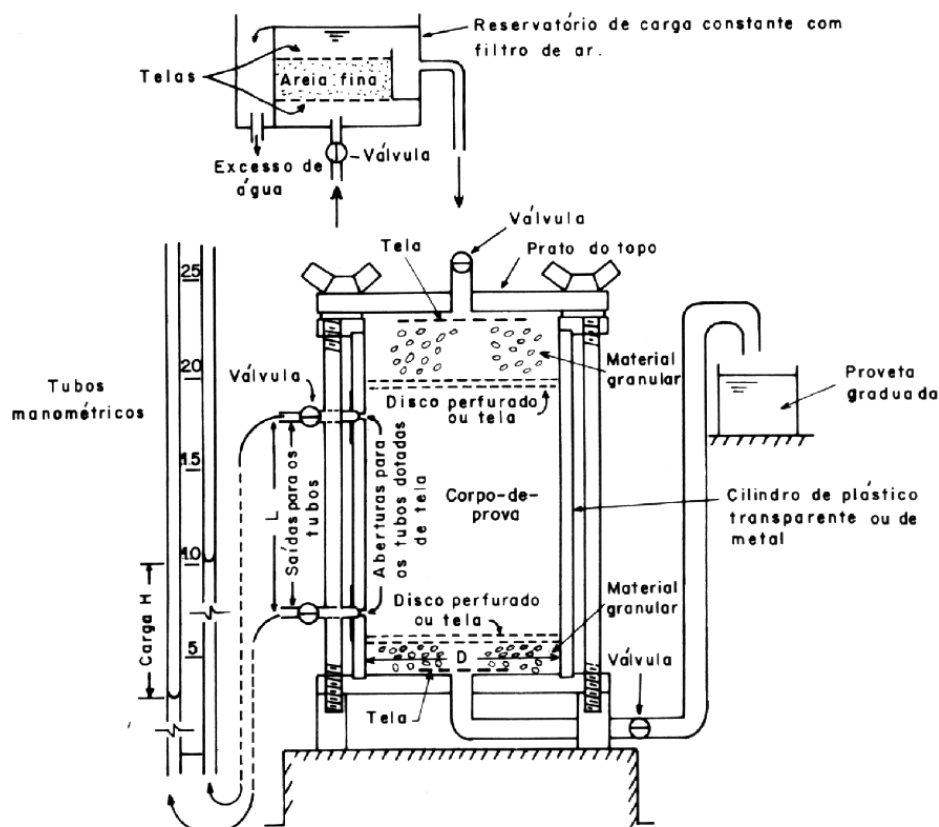
2.1.3.4 Ensaios de determinação da permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade do solo pode também ser obtido através da realização de ensaios *in situ* ou conduzidos em laboratório. Os mais conhecidos são os ensaios de permeabilidade à carga constante, permeabilidade à carga variável e ensaios de infiltração e bombeamento realizados em campo.

2.1.3.4.1 Permeabilidade à carga constante

Este método de determinação da permeabilidade é adotado para solos granulares, como areias e pedregulhos, é regido pela NBR 13292/1995 e consiste na medição do volume de água, que permeia por um corpo de prova devidamente preparado, com altura e seção conhecidas. A aparelhagem utilizada neste ensaio segue apresentada na Figura 4.

Figura 4: Permeâmetro NBR 13292.



Fonte: ABNT (1995).

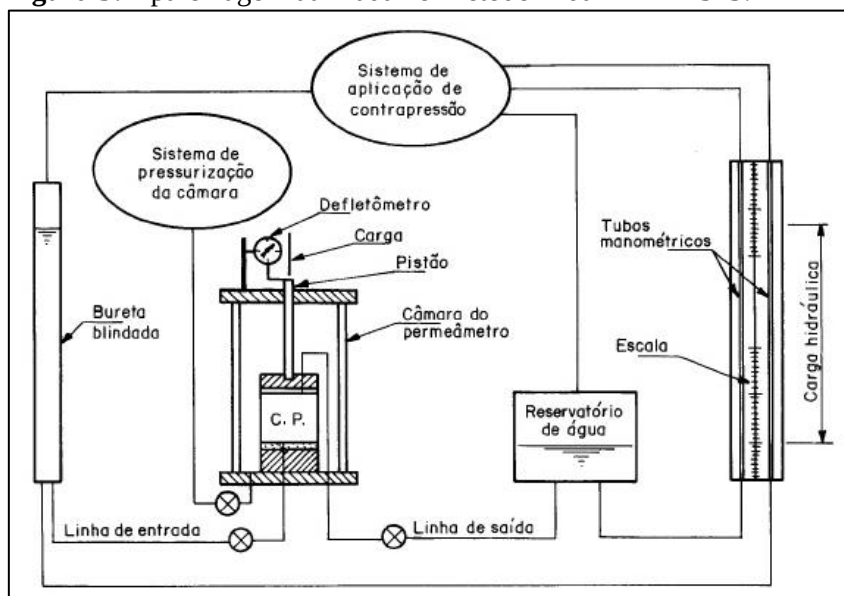
2.1.3.4.2 Permeabilidade à carga variável

A determinação da permeabilidade à carga variável é aplicada a solos argilosos. Este método é regido pela NBR 14545/2000, e fundamenta-se na Lei de Darcy. Obedecendo também a essa Lei, o ensaio é realizado com água percolando através do solo em regime de escoamento laminar, tal como é possível e deve ser considerado o escoamento na maioria dos solos naturais.

O procedimento de ensaio pode ser realizado de acordo com dois métodos diferentes prescritos na norma, e podem ser utilizados corpos de prova talhados ou moldados, obtidos através de amostras de solo indeformadas ou da compactação de amostras deformadas.

O Método A utiliza-se de compressão, o que assegura uma efetiva saturação do corpo de prova. Este método é o mais recomendável, já que o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento da quantidade de ar presente no material. A realização do ensaio de acordo com este método ocorre em nível controlado de tensões efetivas. A aparelhagem empregada no Método A pode ser verificada na Figura 5.

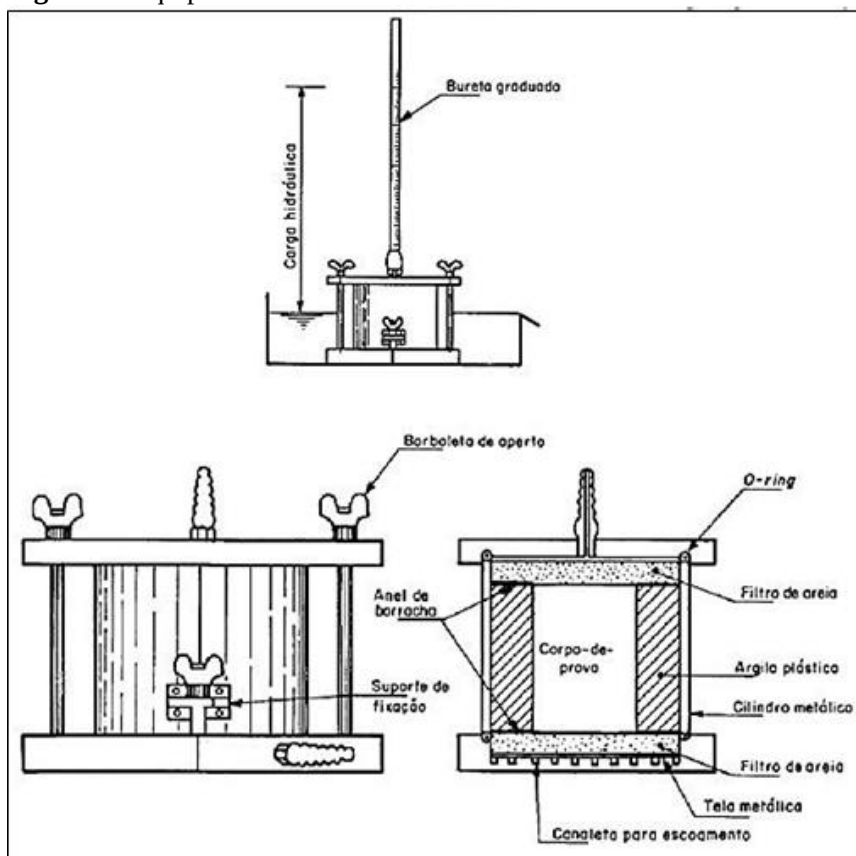
Figura 5: Aparelhagem utilizada no Método A da NBR 14545.



Fonte: ABNT (2000).

O Método B pode ser empregado caso não haja a disponibilidade da aparelhagem da Figura 5. Este método é realizado em condições sensivelmente menos controladas. Para a realização deste ensaio, é utilizado um sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas, constituído por uma bureta de vidro graduada e o permeômetro do Método B, conforme Figura 6. O ensaio consiste na medição da carga hidráulica do sistema em diferentes instantes de tempo (t). Esses dados são relacionados em equação que permite a determinação do coeficiente de permeabilidade.

Figura 6: Equipamento utilizado no Método B da NBR 14545.



Fonte: ABNT (2000).

2.1.3.5.3 Permeabilidade *in situ*

A determinação da permeabilidade *in situ* pode ser realizada de diferentes maneiras, entre elas através de ensaio de infiltração, ensaio de bombeamento e de ensaio de rebaixamento.

O ensaio de infiltração consiste em realizar o controle do nível d'água em um furo de sondagem, em uma posição constante ao longo de diferentes instantes de tempo, medindo-se a vazão injetada necessária para manter o nível constante.

Para realização do ensaio de bombeamento, deve-se instalar piezômetros próximos um dos outros ou executar no mínimo dois poços de sondagem a uma profundidade inferior ao menor nível d'água obtido a cada ensaio. Este método é recomendável para ser executado em maciços com descontinuidades.

A técnica de ensaio de rebaixamento é realizada a partir de cargas variáveis aplicadas em furos de sondagem ou poços, onde o nível d'água natural é alterado, com o objetivo de

que, ao passo que esse nível d'água seja retomado, sejam realizadas medições ao longo do tempo, relacionando o tempo para reestabelecimento do nível d'água original.

2.1.3.6 Estudos anteriores sobre a permeabilidade do solo de Cascavel

Silva (2016) realizou estudos em campo a fim de obter os coeficientes de permeabilidade do solo de Cascavel ao longo da profundidade. O método adotado por ele foi o ensaio de infiltração, realizado no Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFG). Para a furo realizado na profundidade de 2 m foi encontrado um coeficiente de permeabilidade médio de $5,20 \times 10^{-5}$ cm/s, já para a profundidade de 8 m o valor médio de k foi de $2,00 \times 10^{-5}$ cm/s e por fim, para a profundidade de 15 m o coeficiente de permeabilidade médio obtido foi de $1,81 \times 10^{-5}$ cm/s.

Falkowski (2016) também estudou a permeabilidade do solo laterítico da cidade de Cascavel – PR. Seu estudo se deu através da realização de ensaios de permeabilidade à carga variável com amostras de solo indeformadas coletadas ao longo da profundidade do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFG). Para a profundidade de -2 metros, o coeficiente de permeabilidade médio obtido foi de $7,66 \times 10^{-5}$ cm/s, para -8 metros $6,25 \times 10^{-5}$ cm/s e na cota -15 metros $8,16 \times 10^{-6}$ cm/s. A Tabela 4 apresenta os valores de coeficiente de permeabilidade encontrados por ele.

Tabela 4: Coeficientes de permeabilidade do solo de Cascavel – PR.

Cota	Amostra	Valor de k
- 2 m	1	$7,52 \times 10^{-5}$ cm/s
- 2 m	2	$7,79 \times 10^{-5}$ cm/s
- 8 m	1	$6,05 \times 10^{-5}$ cm/s
- 8 m	2	$6,45 \times 10^{-5}$ cm/s
- 15 m	1	$8,79 \times 10^{-6}$ cm/s
- 15 m	2	$7,53 \times 10^{-6}$ cm/s

Fonte: Falkowski (2016).

2.1.4 Estabilização e melhoramento do solo

Dias (2012) descreve estabilização ou melhoramento do solo como a utilização de qualquer processo de natureza física, química, físico-química ou mecânica (natural ou artificial), com o objetivo de alterar as propriedades do solo, tornando-o capaz de responder satisfatoriamente às solicitações previstas para as mais diversas aplicações e utilização no ramo da construção civil.

Para Núñez (1991) *apud* Specht (2000), o termo estabilização é utilizado quando, para misturas entre solo e cal ou solo e cimento, com grandes concentrações destes aditivos, ocorrem características de durabilidade e resistência satisfatórias para serem empregadas como base de pavimento rodoviário. O termo melhoramento, por sua vez, é atribuído a misturas que apresentam relativa alteração em suas propriedades mecânicas, e utilizam de um baixo teor de aditivos.

Caputo (1987) agrupa os tipos de estabilização em duas categorias: estabilização mecânica e estabilização por adição de aglutinantes. Embora ambas busquem alterar a coesão do solo, a primeira visa conservar ou corrigir a granulometria do solo, gerando uma melhor arrumação das partículas sólidas. Já a segunda, chamada por outros autores de estabilização química, é decorrente da adição de substâncias que buscam alterar determinadas propriedades do solo.

Cruz (2004) *apud* Dias (2012) apresenta a estabilização física como um método através do qual a estabilização ocorre devido às variações nas propriedades do solo, ocasionadas pelo uso de calor e da eletricidade, porém o método acaba não sendo tão utilizado quanto os demais devido ao seu alto custo para aplicação.

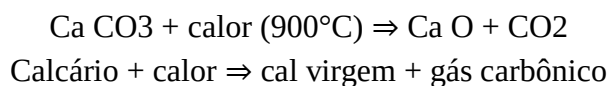
Diversos autores ressaltam a importância de se conhecer as propriedades do solo que se deseja alterar para a escolha do melhor método de estabilização. Caputo (1987) mostra que esse processo de escolha não é um problema de simples resolução, uma vez que são vários os fatores que intervêm nas propriedades do solo.

Na engenharia, o processo de estabilização ou melhoramento do solo, é empregado principalmente para realização de reforço de base e sub-base da construção de estradas, rodovias e pistas de aeroportos, e na construção de barragens. Outra aplicação é para obtenção de misturas de solo-cimento e solo-cal, por exemplo, para utilização dessas como material de construção. O melhoramento do solo também é bastante utilizado durante a construção de aterros, situação na qual a adição de materiais ao solo ocasiona uma redução na permeabilidade deste, evitando a contaminação do lençol freático.

2.1.5 Cal

A cal é o produto obtido pela calcinação de rochas calcárias em temperaturas elevadas e é constituída principalmente por óxido de cálcio. São encontrados três tipos de cales: cal virgem, cal hidratada e cal hidráulica.

A cal virgem é resultante da calcinação de rochas calcárias (CaCO_3) em uma temperatura inferior a de fusão do material, em torno de 850 a 900°C. Seu constituinte principal é o óxido de cálcio em associação com o óxido de magnésio. A cal viva possui em geral a forma de grãos de diversos tamanhos, dependendo do processo de fabricação empregado. A reação que forma a cal virgem é demonstrada abaixo.



A cal hidratada (Ca(OH)_2), apresenta-se sob a forma de pó branco, bem seco e fino e é obtida através da hidratação adequada da cal virgem. Esse material oferece algumas vantagens de uso em relação a cal virgem, pois não precisa ser extinta antes do uso, oferecendo também a maior facilidade para transporte e armazenamento.

Já a cal hidráulica é aquela apresentada na forma de pó seco e cuja calcinação é obtida a temperaturas próximas a do ponto de fusão do calcário com impurezas silico-aluminosas, formando silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio. Estas características dão a este tipo de cal um certo grau de hidráulicidade, ou seja, ela endurece pela ação da água.

2.1.5.1 Melhoramento do solo com adição de cal

A cal é um dos materiais mais empregados na estabilização química do solo. Segundo Sousa (2013), ao se misturar uma determinada quantidade de cal a determinado tipo de solo, iniciam-se imediatamente reações químicas que alteram as propriedades geotécnicas do solo. A mistura solo-cal apresenta variações na plasticidade, granulometria, quantidade de finos e capacidade de carga do solo.

A estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e estrutura do solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica, o que não é somente possível como provável (CRISTELO, 2001).

As principais características que afetam as reações entre os solos e a cal são: a granulometria, a superfície específica, a reatividade, o peso específico, a solubilidade e o teor em cálcio (SILVA, 2010).

2.1.5.2 Estudos anteriores com aplicação de cal ao solo de Cascavel

Volpato (2015) realizou estudos relacionados a adição de cal ao solo laterítico da cidade de Cascavel – PR, com amostras de solo coleados no CEEF. Os ensaios realizados por ele para determinação dos teores de cal a serem incorporados ao solo, objetivando um pH satisfatório acima de 12,4, resultou nos valores da Tabela 5.

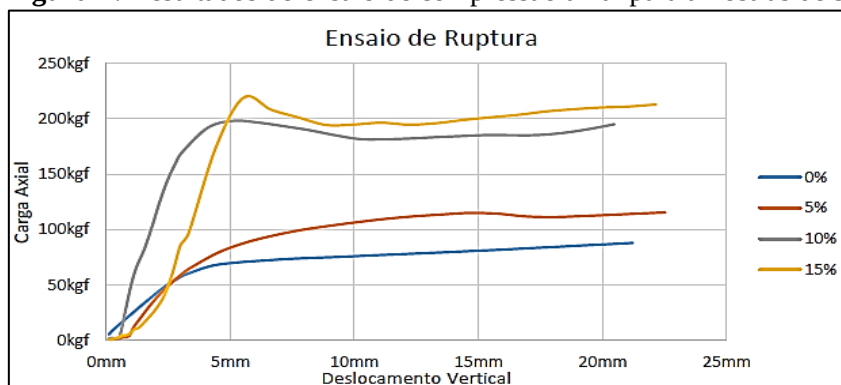
Tabela 5: Determinação dos teores de cal a serem adicionados ao solo.

Amostra	% cal	Massa solo	Massa cal	Quantidade de água	pH
1	0%	20,0g	0,0g	100ml	5,40
2	3%	19,4g	0,6g	100ml	9,91
3	5%	19,0g	1,0g	100ml	10,48
4	8%	18,4g	1,6g	100ml	11,53
5	10%	18,0g	2,0g	100ml	11,82
6	15%	17,0g	3,0g	100ml	12,10
7	20%	16,0g	4,0g	100ml	12,14
8	25%	15,0g	5,0g	100ml	12,21

Fonte: Volpato (2015).

O objetivo de Volpato (2015) foi analisar a influência que a adição de cal do tipo CH III, nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% , exerce na resistência ao cisalhamento do solo da cidade de Cascavel–PR. Os resultados obtidos através do ensaio de compressão triaxial são verificados na Figura 7. A curva em azul refere-se a amostra ensaiada sem adição de cal. As curvas em vermelho, cinza e amarelo correspondem respectivamente aos teores de 5%, 10% e 15% de cal.

Figura 7: Resultados do ensaio de compressão axial para amostras de solo-cal.



Fonte: Volpato (2015).

Através desse estudo, Volpato (2015), constatou que cal hidratada interferiu positivamente na resistência ao cisalhamento do solo analisado aumentando os valores de coesão e ângulo de atrito interno dos grãos.

2.1.6 Cimento

O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. A mistura água-cimento, nas proporções adequadas, forma uma pasta homogênea, capaz de endurecer e conservar sua estrutura, mesmo em contato novamente com a água. Na forma de concreto, o cimento torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra.

Cimento Portland é o tipo de cimento mais utilizado na construção civil devido a sua resistência. Esse material possui características que lhe são peculiares, como trabalhabilidade, moldabilidade, alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo. Insustituível em obras civis, o cimento pode ser empregado tanto em peças de mobiliário urbano como em grandes barragens, em estradas ou edificações, em pontes, tubos de concreto ou telhados.

2.1.6.1 Melhoramento do solo com adição de cimento

O melhoramento do solo com adição de cimento começou a ser utilizado em tratamentos de leitos de estradas e pavimentação. O cimento é considerado um ligante hidráulico, pois a sua ativação só ocorre em contato com a água. Essa ligação faz com que o

cimento une as partículas do solo. Contudo, ele não altera a estrutura dos solos com a mesma expressividade que a cal faz.

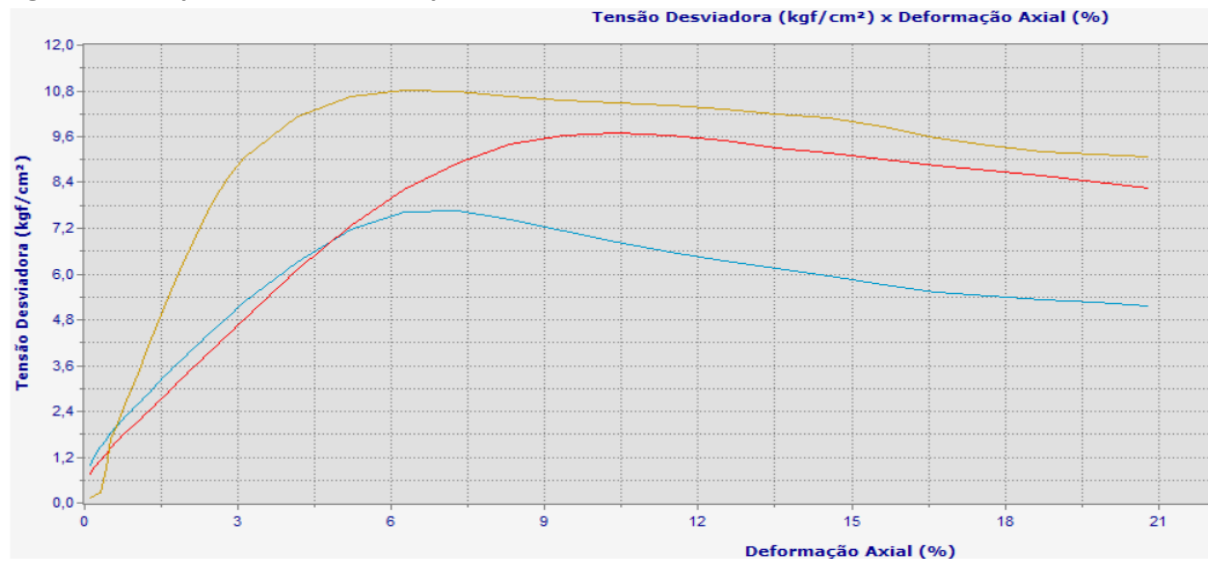
De acordo com Vargas (1977), a dosagem dos teores de solo-cimento é realizada por meio do ensaio de compactação, no qual uma determinada quantidade de solo, cimento e água é misturada e compactada. No entanto, como ocorre hidratação no cimento, é preciso que os corpos de prova sejam moldados rapidamente.

2.1.6.2 Estudos anteriores com aplicação de cimento ao solo de Cascavel

Gomes (2016) realizou um estudo com misturas de solo-cimento com objetivo de analisar a influência da adição de cimento na resistência ao cisalhamento do solo de Cascavel - PR. Para tanto, utilizou o cimento Portland CP II Z 32 R, que é largamente utilizado em obras de pavimentação com melhoramento de solo, em quatro diferentes teores: 5%, 10%, 15% e 20%.

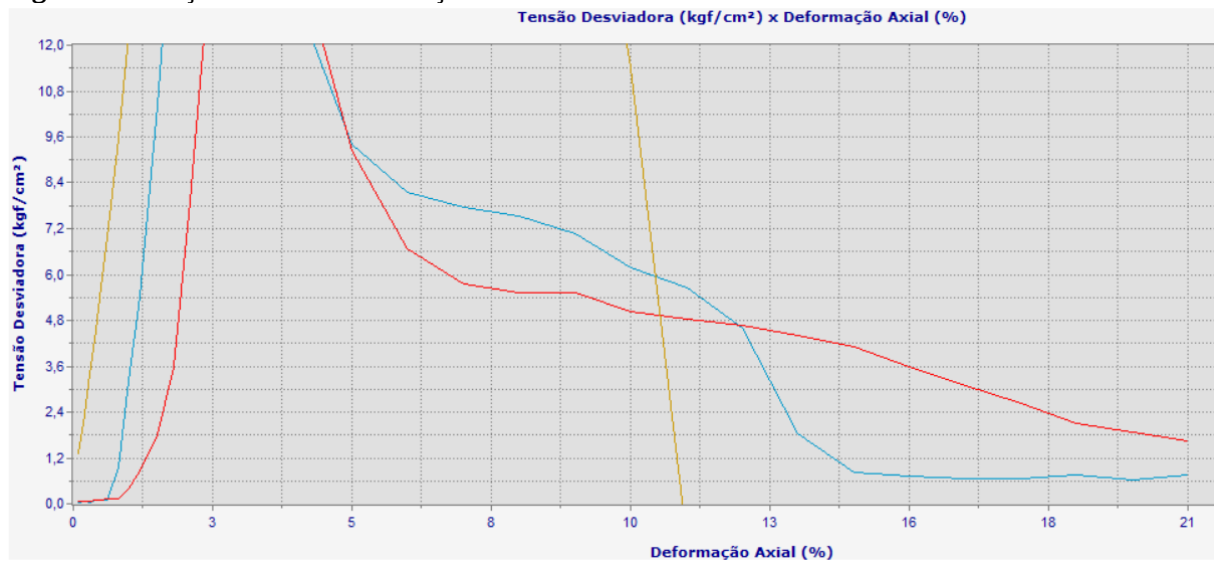
As Figuras 8 e 9 mostram as relações tensões x deformações obtidas por Gomes (2016) para os corpos de prova com adição de 5% e 20% de cimento respectivamente. No primeiro gráfico podemos perceber que, para o material que possui pouca quantidade de cimento, a relação entre tensão e deformação conduz a uma baixa rigidez, indicando que o material terá grandes deformações mesmo quando submetido a baixas tensões. À medida que a quantidade de cimento aumenta, conforme Figura 9, a rigidez do solo, representada pelo ângulo de subida da curva, também aumenta, o que acarreta que o material sofrerá baixíssimas deformações com o acréscimo de tensões. Os resultados obtidos por ele apresentaram-se satisfatórios, comprovando o aumento de resistência do solo estudado para todas as dosagens de cimento empregadas.

Figura 8: Relação tensão x deformação CP com 5% de cimento.



Fonte: Gomes (2016).

Figura 9: Relação tensão x deformação CP com 20% de cimento



Fonte: Gomes (2016).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo

Trata-se de uma pesquisa quantitativa da permeabilidade do solo superficial e laterítico de Cascavel-PR, após este sofrer adições de cal e de cimento. Para esse estudo foram utilizados corpos de prova compactados, sendo empregadas, além de amostras compactadas sem aditivos, amostras contendo três diferentes teores para cada estabilizante: 10%, 15% e 20% de cal em massa, e 10%, 15% e 20% em massa de cimento. Os corpos de prova foram compactados na energia de *Proctor* normal e na modificada, obedecendo a umidade ótima de compactação para cada uma delas e seguindo as especificações da NBR 7182/2016 – Solo - Ensaio de compactação.

A coleta de dados deu-se através dos resultados de ensaios de permeabilidade conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, respeitando às diretrizes do método B da NBR 14545/2000 – Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.

3.1.2 Localização da área de estudo

A cidade de Cascavel fica localizada a oeste do estado do Paraná e de acordo com dados do IBGE (2018), o município tem mais de 300 mil habitantes. A altitude média da cidade é de 781 metros em relação ao nível do mar e conforme referências do Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG), possui uma área de cerca de 2.100 km².

Para a realização deste estudo foram utilizadas amostras de solo coletadas no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEf), localizado de acordo com a Figura 10.

Figura 10: Local de coleta de amostras.

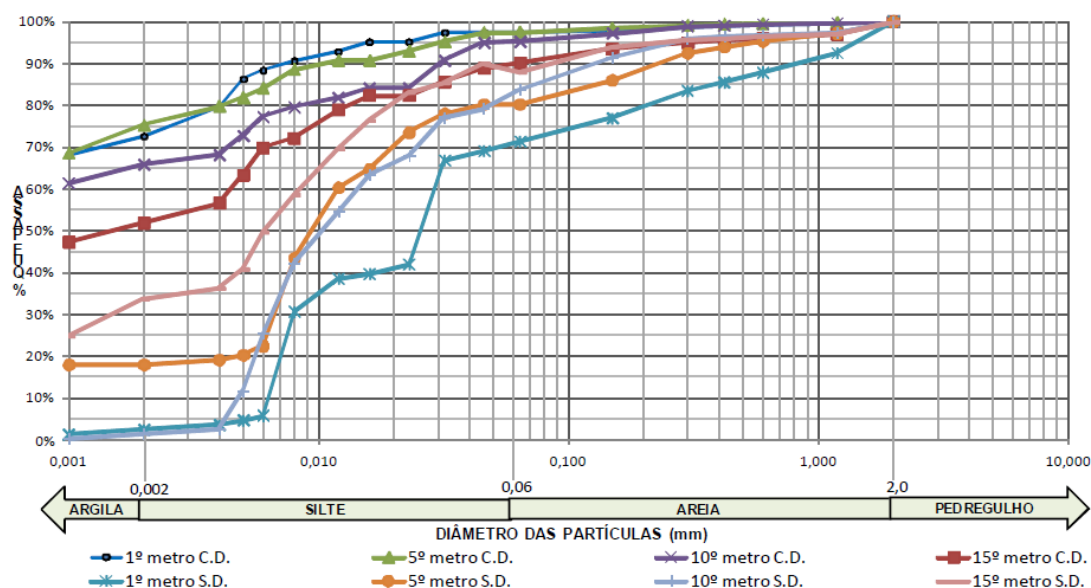


Fonte: Google Maps (2018).

3.1.3 Caracterização do solo local

Estudos publicados por Zen e Almeida (2018), mostram as curvas granulométricas obtidas ao longo da profundidade para o solo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), avaliando ainda a influência da flocculação das partículas na granulometria, através de ensaios conduzidos com (C.D.) e sem (S.D.) o uso de defloculante, conforme Figura 11.

Para o primeiro metro de solo foram encontradas as porcentagens de 1,88% de argila, 68,65% de silte e 29,47% de areia, referentes à amostra sem defloculante e 71,86%, 25,47% e 2,67% dos respectivos materiais para a amostra ensaiada com defloculante. As diferenças apresentadas confirmam que o solo de Cascavel-PR é laterítico, verificando que há cimentação entre as partículas que compõem o solo e que essas são realmente rompidas quando da utilização de defloculante durante o ensaio de sedimentação.

Figura 11: Curvas granulométricas do solo do CEEF com e sem a influência de defloculante.

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Além da granulometria do solo, Zen e Almeida (2018) analisaram os principais índices físicos e algumas propriedades do solo do CEEF ao longo de sua profundidade, o que permitiu classificá-lo pelo Sistema de Classificação Rodoviário (T.R.B.) e pelo Sistema de Classificação Unificado de Solos (S.U.C.S.). A Tabela 6 mostra um resumo dos principais índices físicos e características obtidos no estudo.

Tabela 6: Valores médios do solo.

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1m a 9m	CAMADA 2 10m a 15m
w (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
IP (%)	15	17
Peso específico seco (kN/m³)	12	12
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	27	27
Peso específico saturado (kN/m³)	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole a média	Rija a dura
Índice de Vazios	1,22	1,55

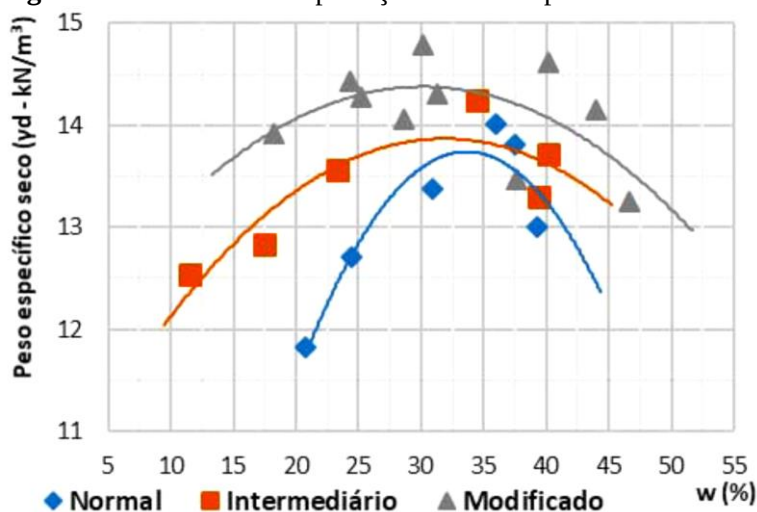
Fonte: Zen e Almeida (2018).

De acordo com o Sistema Rodoviário (T.R.B.), o solo foi classificado como A-7-6, referente a solos com aplicação de regular à má para pavimentação, por possuir elevadas

porcentagens de finos. Já para o Sistema Unificado de Classificação de Solos (S.U.C.S.), o solo estudado classificou-se como CH, que são solos argilosos muito compressíveis.

Os teores de umidade ótimo de compactação do solo foram os obtidos por Zen e Almeida (2018), em estudo realizado com amostras de solo laterítico do CEEF. As curvas de compactação obtidas por eles para os três níveis de energia são apresentadas na Figura 12 e os valores de teor de umidade ($w_{\text{ótimo}}$) e peso específico seco (γ_d) na Tabela 7.

Figura 12: Curvas de compactação do solo superficial do CEEF.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Tabela 7: Valores do ponto ótimo de compactação.

Energia	$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m³)	$W_{\text{ótimo}}$ (%)
Normal	14,0	40,0
Intermediária	13,9	32,5
Modificado	14,5	26,0

Fonte: Zen e Almeida (2018).

3.1.4 Coleta e preparação das amostras de solo

As amostras utilizadas foram do tipo deformada e compostas por solo superficial do 1º e 2º metro de profundidade. Utilizando ferramentas simples como pá e enxada, foram coletados cerca de 50 kg de solo para realização dos ensaios. Após a coleta, as amostras foram dispostas em bandejas metálicas e levadas para secagem prévia em estufa, onde permaneceram por um tempo mínimo de 24 horas, para depois então, serem levadas ao destorroador mecânico, a fim de desmanchar os torrões de solo. Em seguida, o solo destorroado foi passado na peneira 16, conforme numeração da ABNT, a fim de

homogeneizar. A Figura 13 apresenta as etapas de coleta, destorroamento e peneiramento das amostras.

Figura 13: Coleta e preparação de amostras.



Fonte: Autora (2018).

3.1.5 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada através do ensaio de *Proctor*, descrito na NBR 7182/2016, utilizando os níveis de energia de compactação normal e modificada. A umidade ótima de compactação utilizada foi a encontrada por Zen e Almeida (2018), sendo 40% para a energia de compactação normal e 26% para a energia modificada.

Foi necessário também realizar a correção do número de golpes empregados em cada camada durante a moldagem, tendo visto que, como o corpo de prova deveria ter altura da ordem de 10 cm, para o ensaio de permeabilidade, o cilindro de *Proctor* não foi moldado em sua totalidade, o que alterou o volume do corpo de prova e consequentemente alteraria a energia de compactação por unidade de volume. Fixaram-se então o número de camadas, peso e altura de queda do soquete, volume do corpo de prova e energia de compactação, que aplicados à Equação 4, da energia de compactação por unidade de volume, resultaram no número de golpes para cada camada, conforme Tabela 8.

$$E = \frac{G \times N \times P \times H}{V} \quad (4)$$

Onde,

E é a energia de compactação por unidade de volume em $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$;

G é o número de golpes aplicados a cada camada;

N é o número de camadas;

P é o peso do soquete em kN ;

H é a altura de queda do soquete em m ;

V é o volume do molde cilíndrico em m^3 .

Tabela 8: Características inerentes à compactação.

Nível de energia	Normal	Modificada
Tamanho soquete	Pequeno	Grande
Energia ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$)	600	2800
Volume do CP (m^3)	$7,85 \times 10^{-4}$	$7,85 \times 10^{-4}$
Massa soquete (g)	2500,00	4536,00
Altura queda soquete (m)	0,305	0,457
Camadas	3	5
Número de golpes	21	22

Fonte: Autora (2018).

Para realização dos ensaios, além de dois corpos de prova moldados com solo sem incorporação de aditivos, considerando duas diferentes energias de compactação, foram necessários mais doze corpos de prova, que levaram em consideração as combinações das condições: dois tipos de aditivo, três diferentes teores de aditivo e dois diferentes níveis de energia de compactação. Foram moldados dois corpos de prova por dia, tendo visto a disponibilidade de apenas dois permeâmetros para a realização dos ensaios e o período de cura necessário. Para facilitar a dosagem dos materiais, bem como a moldagem dos corpos de prova, foi elaborada a Tabela 9.

Tabela 9: Características de moldagem.

ADITIVO	ENERGIA	% ADITIVO	SOLO (g)	ADITIVO (g)	ÁGUA (ml)	CAMADAS	GOLPES
SEM ADIT.	NORMAL	0	1500	0	600	3	21
	MODIFICADA	0	1500	0	390	5	22
CIMENTO	NORMAL	10	1500	150	600	3	21
		15	1500	225	600	3	21
		20	1500	300	600	3	21
	MODIFICADA	10	1500	150	390	5	22
		15	1500	225	390	5	22
		20	1500	300	390	5	22
CAL	NORMAL	10	1500	150	600	3	21
		15	1500	225	600	3	21
		20	1500	300	600	3	21
	MODIFICADA	10	1500	150	390	5	22
		15	1500	225	390	5	22
		20	1500	300	390	5	22

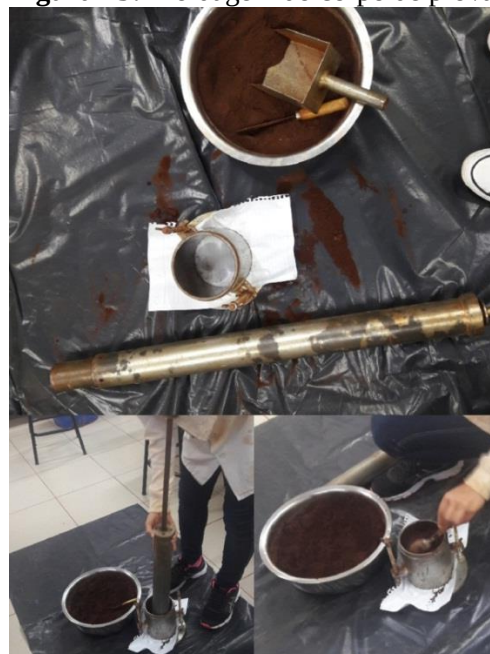
Fonte: Autora (2018).

Para a moldagem, o solo já destorroado e peneirado foi previamente levado à estufa por um período mínimo de 24 horas, a fim de que a umidade ótima para compactação fosse garantida apenas pela adição do volume de água apresentado na Tabela 8. O cimento utilizado foi do tipo CP II–Z–32 da marca Votoran, a cal foi do tipo CH-III da marca Cal Chimelli e a água utilizada na moldagem foi água de torneira. Os materiais foram pesados em uma balança de precisão e a quantidade de água foi medida com auxílio de uma proveta, conforme Figura 14.

O aditivo foi então misturado ao solo e a água foi adicionada gradativamente, revolvendo a mistura continuamente. Com o material completamente homogeneizado, preparou-se o molde cilíndrico, passando óleo mineral nas paredes do cilindro e colocando em sua base uma folha de papel filtro para evitar aderência de material compactado à superfície metálica e iniciou-se o processo de compactação, respeitando as especificações de número de camadas e quantidade de golpes por camadas estabelecidas, conforme Figura 15.

Figura 14: Materiais dosados para mistura.

Fonte: Autora (2018).

Figura 15: Moldagem do corpo de prova.

Fonte: Autora (2018).

O molde cilíndrico foi então removido de sua base e com o auxílio do extrator de amostras, o corpo de prova foi extraído do molde e colocado em um saco plástico devidamente identificado, de acordo com a Figura 16, onde permaneceu em processo de cura durante sete dias.

Figura 16: Amostra extraída e isolada para cura.

Fonte: Autora (2018).

3.1.5.1 Tempo de cura

Após a moldagem, os corpos de prova foram isolados em sacos plásticos, a fim de conservar a umidade de moldagem, e permaneceram em processo de cura durante sete dias.

Sanbonsuge *et al.* (2017) apontam que no Brasil, os processos de dosagem comumente empregados para misturas de solo-cal e solo-cimento obtêm as características mínimas desejáveis aos sete dias de cura, uma vez que esse período é necessário para que ocorram as reações necessárias entre os materiais, para que seus efeitos sejam observados.

Ainda segundo os autores, além do tempo de cura, a umidade também interfere nos resultados obtidos, uma vez que ao compactar o solo, a variação da umidade, seja por ganho, como por perda, também exerce influência no comportamento mecânico deste. Os solos lateríticos depois de compactados permitem a perda água, mas não a reabsorvem totalmente.

3.1.6 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade empregado foi utilizou carga variável, uma vez que para solos argilosos, onde a permeabilidade é considerada baixa, o ensaio à carga constante obtém resultados pouco precisos. Neste tipo de ensaio, medem-se os valores das cargas hidráulicas obtidos para diversos instantes de tempo decorridos desde o início das medições. Utilizou-se então a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga constante, conforme NBR 14545/2000. O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o permeâmetro do Método B da referida norma.

3.1.6 .1 Equipamentos e materiais utilizados

Os equipamentos e materiais necessários para realização do ensaio de acordo com o Método B da NBR 14545/2000 foram:

- Permeâmetro do Método B, padronizado de acordo com a NBR 14545/2000, constituído por um cilindro metálico com dimensões internas na ordem de 15cm de diâmetro e 13cm de altura, acoplado a duas tampas, com um orifício que permita a entrada de água na fase de saturação do corpo de prova, e a saída da água na fase de leitura;
- Sistema para aplicação e medição das cargas hidráulicas, constituído por uma bureta de vidro graduada em décimos de centímetro, conforme Figura 17;

Figura 17: Permeâmetro do método B e bureta graduada.



Fonte: Autora (2018).

- Argila plástica do tipo bentonita;
- Areia grossa;
- Termômetro com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$;
- Cronômetro com indicação de segundos;
- Água para percolação;
- Paquímetro para verificação das dimensões dos corpos de prova;
- Anéis de material polimérico para evitar o contato entre a argila plástica e a camada de areia grossa
- Parafina líquida e pincel para revestir os corpos de prova.

3.1.6 .2 Procedimento do ensaio

Inicialmente, com uma faca simples, realizou-se a regularização da superfície do corpo de prova e verificaram-se as dimensões deste com auxílio do paquímetro digital, para garantir diâmetro e altura da ordem de 10 cm exigidos pela norma. A fim de garantir que a percolação ocorresse ao longo do corpo de prova sem que houvesse fuga da água pelas lateais e para garantir a integridade física deste durante a montagem do ensaio, aplicou-se, com

auxílio de um pincel, uma fina camada de parafina nas laterais e na borda superior do corpo de prova, de acordo com a Figura 18.

Figura 18: Aferição das dimensões e corpo de prova parafinado.



Fonte: Autora (2018).

Para a preparação da base do permeâmetro, primeiramente colocou-se na tampa inferior uma tela metálica com malha de abertura de 2 mm sobre a qual foi adicionada uma camada de cerca de 1 cm de altura de areia grossa. A camada de areia foi então coberta por uma manta geotêxtil para impedir a passagem de finos que pudessem ocasionar problemas durante a percolação de água e, acima desta foi colocado um anel feito de material polimérico para garantir o isolamento da argila. O corpo de prova foi então colocado no centro desse conjunto, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19: Preparação da base do permeâmetro.



Fonte: Autora (2018).

O cilindro foi então acoplado junto à base do permeâmetro e passou-se para a etapa de preenchimento deste com a argila plástica. Foi utilizada uma argila plástica do tipo bentonita, que possui baixíssima permeabilidade, garantindo que sua utilização não prejudicasse os resultados obtidos. A argila foi preparada e moldada em bastões que foram colocados no interior do cilindro e adensados em camadas da ordem de 2 cm de espessura. Nesta etapa foi necessário cuidado tanto no ponto de preparação da argila, quanto na força de adensamento aplicada para não comprometer o completo confinamento do corpo de prova e evitar que a argila entrasse por baixo dele, comprometendo o ensaio.

A argila foi adicionada até a altura do corpo de prova, onde foi recoberta por outro anel de material polimérico e pela manta geotêxtil respectivamente. O cilindro foi preenchido com areia grossa e então colocou-se a tampa superior, de acordo com a Figura 20.

Figura 20: Aplicação da argila bentonítica e montagem do permeâmetro.



Fonte: Autora (2018).

Com o equipamento já montado e devidamente fechado, iniciou-se a saturação do corpo de prova com a percolação de água no sentido ascendente efetuada através do orifício contido na tampa inferior do permeâmetro. A saturação ocorreu até que houvesse o surgimento de água no orifício localizado na tampa superior, permanecendo neste processo por cerca de 24 horas para assegurar a completa saturação do corpo de prova.

Após a saturação, foi conectado ao orifício localizado na tampa superior o sistema de aplicação e medição das cargas hidráulicas, demonstrado na Figura 21. A água utilizada nesta etapa foi, conforme indicação da NBR 14545/2000, água de torneira, a mesma utilizada na moldagem dos corpos de prova e durante a percolação na fase de saturação.

Figura 21: Permeâmetro acoplado ao sistema de aplicação e medição das cargas hidráulicas.



Fonte: Autora (2018).

Com o equipamento montado e certificando-se que não houvesse bolhas de ar no sistema, com um cronômetro iniciou-se a contagem de quatro tempos, sendo dois tempos de 5 minutos e dois tempos de 10 minutos, até o acumulado de 30 minutos, anotando-se para cada um os tempos decorridos t_1 e t_2 e as respectivas cargas hidráulicas h_1 e h_2 (em centímetros) medidas através da bureta graduada acoplada ao sistema. Durante toda a realização do ensaio um termômetro permaneceu imerso em uma proveta com água, anotando-se a temperatura marcada a cada medição.

Os valores obtidos foram posteriormente utilizados para o cálculo do coeficiente de permeabilidade e a operação foi repetida até que os quatro valores de k obtidos não apresentassem grandes tendências de variação, tanto para mais quanto para menos.

3.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Com os dados obtidos no ensaio das cargas hidráulicas para cada instante (t), o coeficiente de permeabilidade de cada corpo de prova foi calculado através da Equação 5.

$$k = \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (5)$$

Onde:

- k é o coeficiente de permeabilidade expresso de forma exponencial com base 10, com dois algarismos significativos em centímetros por segundo;
- Δt é dado pela diferença entre os instantes t_1 e t_2 , em segundos;
- h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 , em centímetros;
- h_2 é a carga hidráulica no instante t_2 , em centímetros;
- a é a área interna da bureta de vidro, em centímetros quadrados;
- H é a altura inicial do corpo de prova, em centímetros;
- A é a área inicial do corpo de prova, em centímetros quadrados.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão descritos os resultados obtidos no ensaio de determinação da permeabilidade à carga variável realizado com os corpos de prova com diferentes teores de cal e cimento incorporados ao solo.

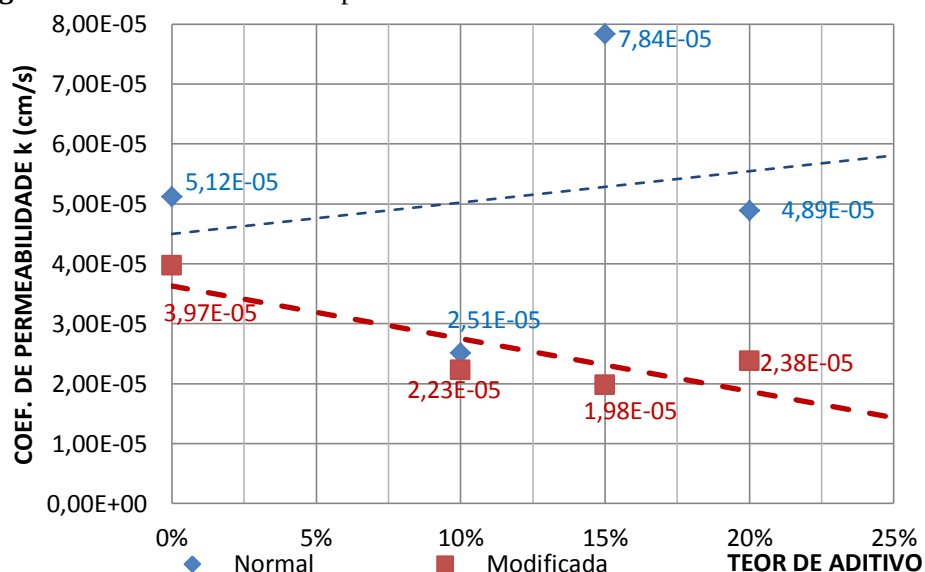
4.1.1 Solo - cimento

Segundo Brito e Paranhos (2017), as reações químicas no solo estabilizado com cimento começam com o processo de hidratação do grão de cimento, que ocorre de forma lenta e tem como produto os cristais de etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado), aportilandita (Ca(OH)_2), a alita (C3S), a belita (C2S) e o monossulfualuminato de cálcio hidratado.

De acordo com Makusa (2013) e Mehta *et al.* (1994), o hidróxido de cálcio pode reagir com os materiais pozzolânicos presentes no solo, produzindo mais silicato amorfo cimentando, o que diminui os espaços vazios do solo, aumentando sua resistência.

Com os ensaios realizados em laboratório, foi possível obter os valores do coeficiente de permeabilidade do solo laterítico e superficial de Cascavel/Pr melhorados com a adição de cimento nos teores de 10%, 15% e 20% e para o solo compactado sem aditivos, conforme mostra a Figura 23, onde os pontos em azul referem-se à energia de compactação normal e os pontos em vermelho à energia de compactação modificada.

Figura 22: Resultados obtidos para as misturas de solo-cimento.



Fonte: Autora (2018).

Silva (2016), através de ensaios de infiltração conduzidos em campo, encontrou um coeficiente de permeabilidade médio de $5,20 \times 10^{-5}$ cm/s para a cota -2 m do solo de Cascavel. Já Falkowski (2016), realizou ensaios de permeabilidade à carga variável e constatou um coeficiente de permeabilidade médio de $7,66 \times 10^{-5}$ cm/s para a mesma cota desse solo.

Comparando os resultados obtidos do melhoramento do solo com adição de cimento aos coeficientes de permeabilidade do solo compactado sem aditivos e àqueles apresentados para o solo *in natura*, é possível perceber que, em geral, houve uma significativa redução da condutividade hidráulica do solo. O melhor resultado obtido foi para os corpos de prova que sofreram adição de 15% em massa de cimento e foram compactados na energia modificada de Proctor.

É possível perceber também que, em geral, os corpos de prova compactados na energia de Proctor modificada apresentaram valores menores do que as amostras compactadas na energia normal, confirmando a influência da compactação nas propriedades solo, devido à redução dos espaços vazios entre os grãos.

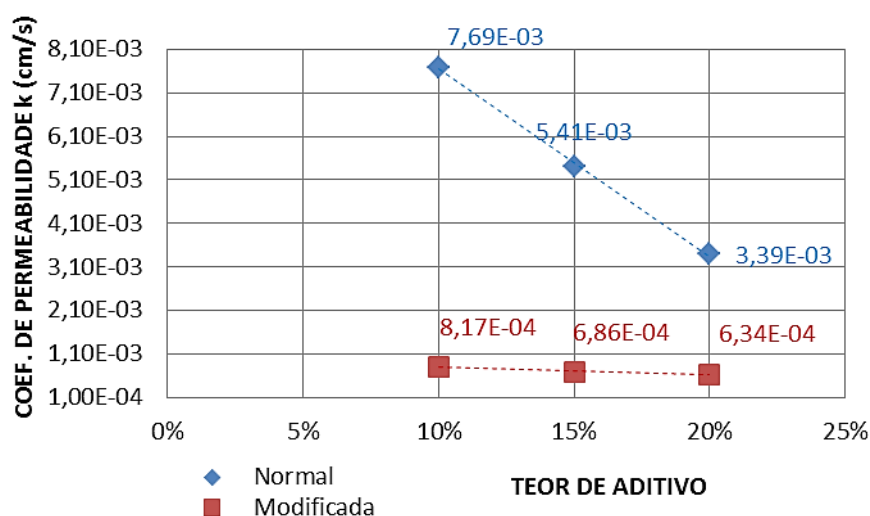
Para os corpos de prova que sofreram adição de 15% em massa de cimento e foram compactados na energia de Proctor normal, o coeficiente de permeabilidade obtido apresentou-se maior do que os coeficientes do solo no estado *in natura* encontrados por Silva (2016) e Falkowski (2016). De acordo com Belleza e Pasqualini (1997), a adição de cimento pode provocar valores de permeabilidade maiores ou menores em relação ao solo não tratado, dependendo do tempo de cura, tipo de solo, umidade e compactação da mistura.

De acordo com a bibliografia, para solos do tipo silte argiloso, os valores típicos de coeficiente de permeabilidade são menores que 10^{-5} cm/s. Comparando os resultados obtidos para as misturas de solo – cimento, observa-se que, mesmo com uma pequena variação, os valores da permeabilidade resultantes dos ensaios condizem com as características pedológicas do solo local que, segundo Zen e Almeida (2018), é predominantemente composto por argila.

4.1.2 Solo - cal

Os ensaios realizados com os corpos de prova moldados a partir de misturas de solo e cal resultaram em valores de coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} cm/s, como mostra a Figura 24, onde os pontos em azul referem-se às amostras compactadas na energia de compactação normal e os pontos em vermelho à energia modificada.

Figura 23: Resultados obtidos para as misturas de solo – cal.



Fonte: Autora (2018).

Os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade das misturas solo-cal apresentaram-se maiores do que os valores obtidos para o solo compactado sem aditivo e o solo no estado *in natura*.

Todas as amostras que continham a cal na mistura apresentaram falhas durante a fase de aplicação e medição das cargas hidráulicas onde, a água, que deveria percolar o corpo de prova para a medição das cargas, transpunha o sistema tão rapidamente que a bureta se esvaziava em questão de poucos segundos. Ao desmontar o equipamento, observou-se que o

corpo de prova havia soerguido da base e a argila plástica que o envolvia invadiu sua superfície, conforme mostra a Figura 27.

Figura 24: Soerguimento do corpo de prova.



Fonte: Autora (2018).

Não se pode afirmar que esse caso fortuito tenha decorrido de falhas durante a montagem do permeâmetro ou aplicação da argila plástica, uma vez que os ensaios foram repetidos por duas vezes para todas as seis amostras que continham a mistura de solo e cal e todas elas apresentaram o mesmo problema. Além disso, para os corpos de prova resultantes da mistura de solo-cimento, o equipamento e a bentonita foram montados e moldados de maneira análoga, não apresentando problema algum.

De acordo com Castro (1995), misturas de solo, cal e água causam simultaneamente algumas reações químicas, que resultam em duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida, que pode ser causada devido à troca catiônica, adsorção de cal e reações químicas, por exemplo, e outra etapa lenta, caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam aumento de resistência decorrente da formação de produtos cimentantes e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial à mistura.

Campello *et al.* (2000) *apud* Lovato (2004), afirma que as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência nas misturas de solo cal, através da reação da cal e da água com as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo, formando agentes cimentantes. Em solos lateríticos essas fontes são o argilo mineral, os componentes amorfos e a presença de ferro de diferentes formas.

Porém, de acordo com Carvalho (1988) *apud* Lovato (2004), nos solos lateríticos, a presença de óxidos e hidróxidos de ferro torna a análise do processo um pouco mais

complexa. Segundo o autor, a participação do ferro na reação solo laterítico-cal é difícil de ser avaliada, uma vez que há evidências na literatura que o ferro pode ser ou não um fator positivo nas reações. Quando a ocorrência do ferro se dá como partículas encobrindo as superfícies do argilo-mineral ou como agente cimentante, sua influência poderá ser negativa para reações de solo-cal.

Townsend *et al.* (1971) *apud* Lovato (2004), explica que essa influência negativa ocorre devido ao fato de que a presença de sesquióxidos nas superfícies do argilo-mineral inibe as reações entre o cálcio e a sílica. Para Castro (1995) *apud* Lovato (2004), é possível que os óxi-hidróxidos de ferro e matéria orgânica bloqueiem parte da superfície dos cristais desses argilo-minerais, gerando uma perda de reatividade à cal. Segundo ele, as ligações entre a superfície dos argilo-minerais e o ferro livre são eficazes, originando micro agregados que se transformam em micro nódulos de cristais cauliníticos cimentados e resistentes, porém, é possível que o ferro bloqueie ou imobilize parte da caulinita no interior dos micro nódulos, fazendo com que o solo não revele sua textura argilosa e reaja com dificuldade quando tratado com cal.

Sial (1991) *apud* Castro (1995) estudou a micro estrutura de um Latossolo Roxo, onde constatou que este apresenta abundância em micro nódulos resistentes à compactação, formados por partículas de caulinita cimentadas por hidróxido de ferro, e que essas partículas são dificilmente penetradas pela cal, sendo atacadas apenas externamente.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização do presente estudo buscou analisar as possíveis variações do coeficiente de permeabilidade do solo laterítico e superficial da cidade de Cascavel-Pr através da realização de ensaios de determinação da permeabilidade à carga variável, conduzidos no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Os resultados obtidos para o solo compactado sem a incorporação de aditivos mostraram que a compactação é uma das responsáveis pela redução da permeabilidade, uma vez que os coeficientes de permeabilidade do solo que sofreu compactação apresentou-se menor do que os coeficientes encontrados por Silva (2016), $5,20 \times 10^{-5}$ cm/s, através de ensaios de infiltração em campo e Falkowski (2016) que utilizou em seus ensaios amostras de solo talhadas obtendo um valor de k de $7,66 \times 10^{-5}$ cm/s. Além disso, a energia de compactação empregada também interferiu neste coeficiente, visto que o corpo de prova compactado na energia normal obteve um valor de k de $5,12 \times 10^{-5}$ cm/s, maior que o valor de k atingido através da energia de compactação modificada, que foi de $3,97 \times 10^{-5}$ cm/s.

O cimento apresentou-se como um material satisfatório no que diz respeito à redução da permeabilidade do solo, uma vez que os resultados obtidos apresentaram menores em relação aos coeficientes de permeabilidade do solo sem aditivos. O melhor resultado encontrado foi de $1,98 \times 10^{-5}$ cm/s, para o corpo de prova que sofreu adição de 15% em massa de cimento e foi compactado na energia de *Proctor* modificada.

Já para as misturas de solo-cal, o resultado obtido não foi de acordo com o esperado, uma vez que as bibliografias trazem que o melhoramento de solos argilosos com cal é amplamente empregado devido a sua eficiência e que este reduziria a permeabilidade do solo. Porém, os valores encontrados apresentaram-se maiores do que os coeficientes obtidos para o solo em estado natural e o solo compactado sem adições.

Os resultados encontrados para as amostras de solo-cal podem ter sido influenciados por problemas tanto na moldagem do equipamento e da argila plástica, quando pela estrutura, composição e características do latossolo analisado, uma vez que, segundo Carvalho (1988) *apud* Lovato (2004), quando há ocorrência do ferro no solo como partículas encobrindo as superfícies do argilo-mineral ou como agente cimentante, a influência deste elemento poderá ser negativa para reações de solo-cal. Além disso, as condições de contorno encontradas em

laboratório são completamente distintas das condições realmente encontradas em campo, o que também pode gerar variações no coeficiente de permeabilidade do solo.

Diante desta pesquisa e de seus resultados, pode-se afirmar que a incorporação dos aditivos ao solo provocou sim alterações no coeficiente de permeabilidade do solo laterítico e superficial da cidade de Cascavel/Pr. Embora os resultados encontrados para as misturas de solo-cal sejam destoantes à literatura, uma vez que se esperava redução da permeabilidade no emprego de ambos os aditivos, o aumento da permeabilidade também pode ser visto como uma alteração vantajosa, pois para algumas aplicações a permeabilidade contribui como propriedade favorável, como é o caso de áreas de drenagem de água pluvial por exemplo.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em sugestões para futuros trabalhos, indica-se realizar o estudo da condutividade hidráulica considerando outros fluidos, como esgoto e chorume para solos melhorados com adição de compostos como cimento e cal.

Outra sugestão seria repetir a metodologia apresentada neste trabalho, porém variando os tempos de cura dos corpos de prova para serem ensaiados, verificando a influência destes sobre a eficácia da estabilização.

Também, pode-se realizar um estudo sobre o melhoramento em solos arenosos, fazendo um comparativo sobre a eficácia da estabilização em diferentes tipos de solo.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. São Paulo: TECNOGEO/GEOFIX, 1999.
- ARAÚJO, Carla B. C.; NETO, Silvrano A. Dantas. **Caracterização de Solos Lateríticos para Utilização em Pavimentos de Baixo Custo na Cidade de Canindé/CE**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2014. Goiás: 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro, 2000.
- BELLEZA, I.; PASQUALINI, E. **Hydraulic performance of soil-cement liners**. GeoEnvironmental 97 Rotterdam: A. A. Balkema. p.271-276, 1997.
- BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959.
- 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. Anais... v.1, p.164-174. Brasília, 2000.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos - Volume 1**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1988.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Mecânica das Rochas - Fundações - Obras de Terra - Volume 2**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1987.
- CARVALHO, J. B. Queiroz de. **Propriedades e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal**. In: 23ª Reunião Anual de Pavimentação. Anais... v.1, p.690-706. Florianópolis, 1988.
- CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquioxídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de**

Geopolimerização (Estabilização). Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1995.

COLLARES, A.C.Z.B. (1997). **A Influência de características químicas do fluido de saturação no colapso dos solos.** São Carlos, 97p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 2001.

CRUZ, M., – **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento,** Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Tradução EZ2Translate, revisão técnica: Leonardo Fagundes Rosembach Miranda - São Paulo: Cengage Learning, 2011, 610p.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas.** 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

FALKOWSKI, Thiago Junior. **Análise da permeabilidade de solo argiloso e poroso, do Campo Experimental de Engenharia da FAG, através de ensaios de carga variável.** 2016. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

GOMES, Leandro da Silva. **Determinação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso característico da região de Cascavel/Pr com adição de cimento.** 2016. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ. Disponível em <<http://www.itcg.pr.gov.br/>>. Acesso em 26 de abril de 2018.

José Augusto de Lollo (Org.). **Solos colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas.** – São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró Reitoria de Graduação, 2008.

LOVATO, Rodrigo Silveira. **Estudo do Comportamento Mecânico de um solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação.** 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MAHLER, Claudio F.; AGUIAR, Adriana B. **Determinação da permeabilidade *in situ* em aterros de resíduos sólidos.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Paraíba: 2001.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea? University of Technology, 2013.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. **Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico sob diferentes povoamentos florestais**. Revista Cerne, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos** – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, PAULO J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Pini: São Paulo, 1ª ed., p. 580, 1994.

NEVES, M. **Estudo da permeabilidade do solo colapsível da região de São Carlos**. 1987. 138 f. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

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

PINTO, Nuno Miguel Silva Azevedo. **Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos**. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica e Geoambiental, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2009.

SANBONSUGE, Kendi et al. **Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento**. Transportes, [s.l.], v. 25, n. 4, p.68-82, 30 dez. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i4.1257>.

SANTOS, G. S. **Estudo da permeabilidade em barreiras de impermeabilização**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Feira de Santana – Graduação em Engenharia Civil – Feira de Santana-BA, 2010.

SIAL A.N at al., **Peridotite xenoliths and Tertiary alkalinebasalts in northeastern Brazil**. 5th Intern. Kimberlite Conference, Araxá, Brazil, Field Guide Book, CPRM - Sp. Public, 3/91, 1, p. 3–13, 1991.

SILVA, Cláudia Claumann da. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, Vilmar Figueiredo da. **Determinação do Coeficiente de Permeabilidade *in situ* ao Longo da Profundidade do Solo Colapsível do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-Pr**. 2016. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

SOUSA, Alex Torres de. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

SPECHT, L. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2000.

STEPHENS, Daniel B. **Vadose Zone Hydrology**. Flórida: Lewis Publishers, 1996. 347 p.

TOWNSEND, F. C.; MANKE, P. G.; PARCHER, J. V. **The Influence of Sesquioxides on Lateritic Soil Properties**. Highway Research Board, Bulletin n.374, p.80-92. 1971.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. 2. ed., Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, 509p., 1978.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VOLPATO, Afonso Luiz. **Determinação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso e laterítico da região de Cascavel/Pr com adição de cal hidratada**. 2015. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2015.

ZEN, Beatriz Anne Bordin; ALMEIDA, Maycon André de. **Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/Pr**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. Artigo. Salvador: Abms, 2018.