



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA**

ANA CAROLINA CIRIACO PADILHA

**O EFEITO DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO COLAPSO DO
SOLO SUPERFICIAL DA REGIÃO DE LONDRINA/PR**

Londrina
2014

ANA CAROLINA CIRIACO PADILHA

**O EFEITO DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO COLAPSO DO
SOLO SUPERFICIAL DA REGIÃO DE LONDRINA/PR**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Raquel Souza Teixeira

Londrina
2014

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P123e Padilha, Ana Carolina Ciriaco.

O efeito do fluido de inundação no colapso do solo superficial da região de Londrina/PR / Ana Carolina Ciriaco Padilha. – Londrina, 2014.
181 f. : il.

Orientador: Raquel Souza Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Físico-química do solo – Teses. 2. Esgotamento do solo – Teses. 3. Solos - Lixiviação. – Teses. I. Teixeira, Raquel Souza. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós- graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 625.8

ANA CAROLINA CIRIACO PADILHA

**O EFEITO DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO COLAPSO DO SOLO
SUPERFICIAL DA REGIÃO DE LONDRINA/PR**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Raquel S. Teixeira
UEL – Londrina - PR

Prof. Dr. Carlos J. M. Costa Branco
UEL – Londrina - PR

Prof.^a Dr.^a Heliana B. Fontenele
UEL – Londrina - PR

Prof.^a Dr.^a Nelcí H. M. Gutierrez
UEM – Maringá - RP

Londrina, 25 de Abril de 2014.

Dedico este trabalho a meu pai e
minha mãe sem eles não teria
conquistado mais esta vitória.

AGRADECIMENTO (S)

Agradeço a minha orientadora não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade, compreensão e apoio durante estes dois anos de convivência, não deixando para trás os anos que me auxiliou e orientou durante a graduação em Engenharia Civil, por tudo agradeço imensamente professora e amiga de todas as horas, que acompanhou nesta etapa, Raquel Souza Teixeira.

Aos professores e colegas pelo tempo, conhecimento e emoções compartilhados durante os seis anos de convivência.

Ao colega Charles Moretto que forneceu os dados do Lixiviado, fluido este utilizado durante a pesquisa.

Gostaria de agradecer também algumas pessoas que contribuíram para a realização desta pesquisa através de valiosas contribuições técnicas e o auxílio fornecido para a elaboração deste trabalho, expresso minha profunda gratidão aos seguintes profissionais:

- (a) Prof.^a Dr.^a Deize Dias Lopes;
- (b) Prof. Dr. Carlos J. M. Costa Branco e Prof.^a Dr.^a Heliana B. Fontenele.
- (c) Engenheiro Civil, Mestre Audinil Maringonda Junior;
- (d) Emerson Takashi Komori, Vytor Zambon e Marcel Salomão Oliveira, por moldarem e retirarem as amostras indeformadas e deformadas de solo;
- (e) Aos Técnicos Ivan (Laboratório de Saneamento) e Carlos (Maquetaria)
- (f) Ao Laboratório LABORSOLO, especialmente ao Prof. Dr. Roberto A. Fioretto;
- (g) Ao laboratório de solos do IAPAR.
- (h) Prof. Dr. Luiz Henrique Dall'Antoni.
- (i) A doutoranda em química Renata Afonso.
- (j) Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito.

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar, porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é decidir.” (Cora Carolina)

PADILHA, Ana Carolina Ciriaco. **O Efeito do Fluido de Inundação no Colapso da do Solo Superficial da Região de Londrina/PR.** 2014. 181 p. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

RESUMO

O fenômeno do colapso é caracterizado pelo recalque rápido e acentuado do solo, ocasionado pela diminuição brusca do índice de vazios, geralmente devido ao aumento do teor de umidade do solo (sem que haja necessariamente o aumento de sobrecarga). O perfil do solo Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina é formado por uma argila porosa laterítica, até cerca de 12 metros de profundidade. A camada superficial, até 7 metros, apresenta: baixo teor de umidade, elevada porosidade e potencialmente colapsível (TEIXEIRA *et al.*, 2004, TEIXEIRA *et al.*, 2008). Este solo é considerado como característico da região de Londrina/Pr. O colapso provocado pelo aumento do teor de umidade do solo pode ser causado por chuvas intensas, vazamentos oriundos das redes de esgoto e de abastecimento, fluidos de percolação de lixiviados de aterros sanitários, entre outras fontes. Além do potencial de contaminação, alguns fluidos de inundação podem influenciar no comportamento tensão versus deformação do solo, em função da interação solo-líquido. O presente estudo avaliou o efeito do fluido de inundação no comportamento colapsível do solo poroso e superficial, usando amostras de 2 metros de profundidade do CEEG. Através de avaliações das interações físico-químicas entre o solo e os fluidos de inundação, e conseqüentemente o efeito que estes proporcionam no potencial de colapso. O comportamento colapsível desse solo foi identificado por meio de ensaios edométricos duplos e simples, inundados com fluidos distintos (água, lixiviado e duas soluções preparadas em laboratório - hexametáfosfato ácido e básico). Também foram realizados ensaios para a determinação das características físico-químicas do solo e dos fluidos de inundação, sendo eles: ensaios de caracterização química e mineralógica do solo, ensaios de condutibilidade elétrica do extrato aquoso do solo, ensaio de dispersão do solo, caracterização química e condutibilidade elétrica dos fluidos de inundação. A avaliação do potencial do colapso do solo foi fundamentada nos critérios baseados em índices físicos, nos limites de Atterberg, e critérios baseados em ensaios edométricos. Os resultados obtidos indicam que o solo é colapsível para os 4 fluidos de inundação utilizados, tanto nos ensaios edométricos duplos e simples. Foi possível constatar que os fluidos de inundação alteraram a composição química natural do solo. Para as soluções que apresentaram maiores condutibilidade elétrica ocorreu um aumento na magnitude do colapso do solo. Mas, não foi encontrada, neste estudo, uma relação única entre o potencial de colapso e o pH das soluções e o potencial de colapso e a condutibilidade elétrica do extrato aquoso do solo. Por fim, para as soluções (hexametáfosfato de sódio ácido e básica) preparadas em laboratório não ocorreram diferenças relevantes no potencial de colapso. Porém apresentaram os maiores índices de colapso comparados com a água e o lixiviado.

Palavras-chave: Potencial de colapso. Fluido de inundação. Interações físico-químicas. Condutibilidade elétrica.

PADILHA, Ana Carolina Ciriaco. **The Effect of Flood Fluid on Topsoil Collapse in Region of Londrina/PR**. 2014. 181 p. Thesis submitted to Course of Postgraduate in Engineering of Buildings and Sanitation – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

ABSTRACT

The phenomenon of collapse is characterized by fast and deep repression of soil, caused by the sudden decrease of voids, usually due to increased moisture content of the soil (without necessarily increasing overload). The soil profile Experimental Field of Geotechnical Engineering (CEEG) of Universidade Estadual de Londrina is formed by a porous laterite clay, down to about 12 meters deep. Surface layer, down to 7 meters, has low moisture content, high porosity and it's potentially collapsible (TEIXEIRA et al., 2004, TEIXEIRA et al., 2008). This soil is considered as characteristic of region of Londrina/PR. The collapse caused by the increased soil moisture content can be caused by heavy rains, leaks from the sewage and supply networks, percolating leachate fluids from landfills, among other sources. In addition to potential contamination, some flood fluids may influence the behavior of soil tension versus deformation as a function of soil-liquid interaction. This study evaluated the effect of flood fluid on collapsible behavior of 2 meters deep porous, using superficial soil samples from CEEG. Through evaluations of physical-chemical interactions between soil and flood fluid, the effect on potential collapse will also be evaluated. Collapsible behavior of this soil was identified by means of simple and double oedometric essays flooded with different fluids (water, leachate and two lab-prepared solutions – acid and base hexametaphosphate). Also, essays were performed for determining physical-chemical characteristics of soil and flood fluids, namely: essay for chemical and mineralogical characterization of soil, essays of electrical conductivity of aqueous soil extract, soil dispersion essays, chemical characterization and electrical conductivity of flood fluids. Evaluation of potential soil collapse was grounded on criteria based on physical indexes, Atterberg limits, and criteria based on oedometer essays. Results obtained indicate that soil is collapsible for the 4 flood fluids used both in single and double oedometric essays. It was found that flood fluids changed the natural chemical composition of soil. For solutions that presented higher electrical conductivity, occurred an increase in magnitude of soil collapse. But, in this study, it was not found no unique relationship between potential for collapse and pH of solutions, and between potential for collapse and electrical conductivity of aqueous soil extract. Finally, for solutions (acid and base sodium hexametaphosphate) prepared in the lab, there were no relevant differences in potential for collapse. However, they showed the highest collapse rates against water and leachate.

Keywords: Potential for collapse. Flood fluid. Physical-chemical Interactions. electrical conductivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 2

Figura 2.1 –	Estrutura do Solo carregado: a) antes da inundação; b) após a inundação	30
Figura 2.2 –	Solos Colapsíveis estudados no Brasil	33
Figura 2.3 –	Estrutura Metaestável sustentada por pressões capilares.....	34
Figura 2.4 –	Estrutura Metaestável sustentada por pressões capilares.....	35
Figura 2.5 –	Estrutura Metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.....	36
Figura 2.6 –	Estrutura Metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.....	36
Figura 2.7 –	Estrutura Metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.....	37
Figura 2.8 –	Curva típica do ensaio edométrico simples mostrando uma descontinuidade.....	38
Figura 2.9 –	Curvas de adensamento para a umidade de campo e embebido desde o início	40
Figura 2.10 –	Critério de identificação da colapsibilidade de solos.....	46
Figura 2.11 –	Curva de compressão confinada do ensaio edométrico simples.....	48
Figura 2.12 –	Curva de compressão confinada do ensaio edométrico duplo.....	49
Figura 2.13 –	Curva do ensaio edométrico simples com inundação a 200 kPa.....	50
Figura 2.14 –	Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, cátions aglomerados em volta do coloide	54
Figura 2.15 –	Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, distribuição de íons com a distância da superfície da partícula de argila	54
Figura 2.16 –	Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, curva do potencial elétrico com a distância	54
Figura 2.17 –	Dupla Camada Modelo de Stern.....	55

Capítulo 3

Figura 3.1 –	Visa Geral do CEEG	62
Figura 3.2 –	Perfil de solo característico do CEEG/UEL	63
Figura 3.3 –	Curvas Granulométricas, obtidas com uso de defloculante	64
Figura 3.4 –	Curvas Granulométricas, obtidas sem uso de defloculante	65
Figura 3.5 –	Curvas Características de sucção para profundidade de 4 metros e 6 metros	66
Figura 3.6 –	Variação do Índice de Subsidência	68

Capítulo 4

Figura 4.1 –	Local da coleta das amostras	69
Figura 4.2 –	Croqui do CEEG com a locação do poço n.º 9 e ponto de coleta	70
Figura 4.3 –	Gráfico de TGA referente à profundidade 2,45 m do solo do poço n.º 9 do CEEG	74
Figura 4.4 –	Curva Granulométrica do solo com o uso de defloculante à profundidade 2,00 metros do solo do poço n.º 9 do CEEG.....	75
Figura 4.5 –	Curva Granulométrica do solo sem o uso de defloculante à profundidade 2,00 metros do solo do poço n.º 9 do CEEG.....	75
Figura 4.6 –	Curva de Compactação e Pontos de Máxima eficiência	77
Figura 4.7 –	Confecção e armazenamento do bloco 30X30X30 cm	78
Figura 4.8 –	Difratômetro	80
Figura 4.9 –	(a) Torrão de solo talhado de uma amostra indeformada para a realização do crumb test. (b) e sendo colocado em um béquer contendo água destilada	81
Figura 4.10 –	Condutímetro	82
Figura 4.11 –	100 g de TFSA misturada em 100 ml de água deionizada	83
Figura 4.12 –	Prensa de adensamento: a) um braço que transmite os esforços carregamentos, b) suporte para as cargas, c) Extensômetro, d) Célula de adensamento	85
Figura 4.13 –	Local de coleta do Chorume – lagoa de aeração.....	86

Figura 4.14 – Armazenamento do choro em laboratório	87
Figura 4.15 – Síntese da estratégia de pesquisa	88
Figura 4.16 – Síntese coleta de amostras em campo	89
Figura 4.17 – Síntese dos materiais usados nos ensaios de laboratório.....	89
Figura 4.18 – Síntese dos ensaios de laboratório usando as amostras deformadas	89
Figura 4.19 – Síntese dos ensaios de laboratório usando as amostras indeformadas	90
Figura 4.20 – Síntese dos ensaios de laboratório usando os fluidos de inundação	90

Capítulo 5

Figura 5.1 – Difractogramas “otimizado” de Raio-X.....	97
Figura 5.2 – Torrão de solo talhado de uma amostra indeformada para a realização do Crumb Test.....	98
Figura 5.3 – Torrão imerso em um béquer (a) com água (pH=7,2), (b) com hexametáfosfato de sódio (pH=5,7), (c) com uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio (pH=2,4).....	99
Figura 5.4 – Torrão imerso em um béquer (a) com uma mistura de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio (pH=12,0), (b) com uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio (pH=2,4), (c) com lixiviado (pH=8,4).....	99

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 –	Coeficiente de colapsibilidade (CI).....	47
Tabela 2.2 –	Potencial de colapso segundo o critério de Jennings & Knight (1975)	51
Tabela 2.3 –	Potencial de colapso segundo o critério de Lutenegger & Saber (1988)	52

Capítulo 3

Tabela 3.1 –	Valores índices físicos amostras ensaiadas do CEEG/UEL	65
---------------------	--	----

Capítulo 4

Tabela 4.1 –	Características físicas, granulometria e a relação silte e argila das amostras de solo do poço n.º 9 do CEEG	71
Tabela 4.2 –	Características químicas das amostras de solo do poço n.º 9 do CEEG.....	72
Tabela 4.3 –	Resultados dos ensaios de fluorescência de raio-x nas amostras de solo do poço n.º 9 e uma amostra da rocha basáltica.....	73
Tabela 4.4 –	Perda em massa dos ensaios de ATG para as amostras de solo do poço n.º 9 e um amostra da rocha basáltica.....	74
Tabela 4.5 –	Porcentagens das frações de solo com e sem uso de defloculante a uma profundidade de 2,00 metros do poço n.º 9 do CEEG.....	75
Tabela 4.6 –	Índices físicos do ponto de máxima eficiência da curva de compactação.....	76
Tabela 4.7 –	Parâmetros de adensamento solo compactado.....	77
Tabela 4.8 –	Parâmetros de adensamento solo natural	78
Tabela 4.9 –	Caracterização do Lixiviado do antigo depósito de lixo de Londrina	87

Capítulo 5

Tabela 5.1 –	Análise química das duas amostras de solo de 2,0m de profundidade do CEEG.....	91
Tabela 5.2 –	Análise química do solo no estado natural e após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, em amostras de 2,0 m de profundidade do CEEG.....	93
Tabela 5.3 –	Padrões utilizados no difratograma.....	97
Tabela 5.4 –	Condutibilidade Elétrica do Extrato Aquoso para o solo no estado natural e com este após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, amostras de solo de 2,0 m de profundidade do CEEG.....	100
Tabela 5.5 –	Condutibilidade Elétrica do Fluido de Inundação utilizados nos ensaios edométricos.....	101
Tabela 5.6 –	Critérios baseados em Índices Físicos e Limites de Atterberg.....	103
Tabela 5.7 –	Critérios baseados em ensaios edométricos.....	103
Tabela 5.8 –	Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos.....	105
Tabela 5.9 –	Avaliação de colapso usando os critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg dos corpos de prova dos ensaios duplos.....	106
Tabela 5.10 –	Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaio edométricos duplos.....	107
Tabela 5.11 –	Estimativa de colapso com inundação nas tensões de 25, 50 100 kPa por meio de ensaios edométricos.....	110
Tabela 5.12 –	Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundados com água.....	112
Tabela 5.13 –	Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova dos ensaios edométricos simples inundado com água.....	112
Tabela 5.14 –	Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em de ensaios edométricos simples inundado com água.....	113
Tabela 5.15 –	Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com lixiviado.....	115

Tabela 5.16 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado em Lixiviado com ensaios edométricos simples	115
Tabela 5.17 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples inundado com lixiviado	116
Tabela 5.18 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	118
Tabela 5.19 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio em ensaios edométricos simples	118
Tabela 5.20 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples inundado com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	119
Tabela 5.21 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio	121
Tabela 5.22 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio em ensaios edométricos simples	121
Tabela 5.23 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples inundado com uma mistura de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio	122
Tabela 5.24 – Resumo geral dos índices físicos dos corpos de prova obtidas antes e depois dos ensaios edométricos simples.....	125
Tabela 5.25 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados nos índices físicos e limites de Atterberg.....	126
Tabela 5.26 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados nos ensaios edométricos simples	127

LISTA DE GRÁFICOS

Capítulo 5

- Gráfico 5.1** – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo 104
- Gráfico 5.2** – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo
– com inundação em água desde o início 108
- Gráfico 5.3** – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo
– com inundação em lixiviado desde o início 108
- Gráfico 5.4** – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo
– sem e com inundação inicial, usando a mistura de
hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio desde o
início 109
- Gráfico 5.5** – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo
– sem e com inundação inicial, usando a mistura de o ácido
fosfórico com hexametáfosfato de sódio desde o início 109
- Gráfico 5.6** – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com água
nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa 111
- Gráfico 5.7** – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com
lixiviado nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa 114
- Gráfico 5.8** – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com a
solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio
nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa 117
- Gráfico 5.9** – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com a
solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio
nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa 120
- Gráfico 5.10**– Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber
(1988), em relação ao pH e as tensões de inundação 128
- Gráfico 5.11**– Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber
(1988), em relação ao condutibilidade elétrica (CE) do
extrato aquoso e as tensões de inundação 129
- Gráfico 5.12**– Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber
(1988), em relação ao condutibilidade elétrica (CE) do fluido
de inundação e as tensões de inundação 130

Capítulo 6

Gráfico 6.1 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos.....	134
Gráfico 6.2 – CE do extrato aquoso do solo versus potencial de colapso – i (%), Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos	134
Gráfico 6.3 – CE do fluido de inundação versus potencial de colapso – i (%), Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos	135
Gráfico 6.4 – Curvas de compressão obtidas dos ensaios edométricos simples inundado na tensão de 25 kPa	136
Gráfico 6.5 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa	137
Gráfico 6.6 – CE do extrato aquoso do solo versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa	138
Gráfico 6.7 – CE do fluido de inundação versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.....	139
Gráfico 6.8 – Curvas edométricas obtidas dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.....	140
Gráfico 6.9 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa	141
Gráfico 6.10 – CE do extrato aquoso do solo versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa	142
Gráfico 6.11 – CE do fluido de inundação versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa	143

Gráfico 6.12–	Curvas edométricas obtidas dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.....	145
Gráfico 6.13–	pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa	146
Gráfico 6.14–	CE do extrato aquoso do solo versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa	147
Gráfico 6.15–	CE do fluido de inundação versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa	148

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
CEEG	Campo Experimental de Engenharia Geotécnica

LISTA DE UNIDADES

kPa	Quilopascal
kN/m ³	Quilonewton por metro cúbico
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
cmol _c /dm ³	Centimolc por decímetro cúbico
mg/dm ³	miligrama por decímetro cúbico
g/dm ³	grama por decímetro cúbico
g.kg ⁻¹	grama por quilograma
cm ² /s	centímetro quadrado por segundo
mg CaCO ₃ /l	miligrama de carbonato de cálcio por litro
mg N-NH ₃ /l	miligrama de nitrogênio amoniacal por litro
mg N-NO ₂ ⁻ /l	miligrama de nitrogênio na forma de nitrito por litro
mg O ₂ /l	miligrama de oxigênio por litro
°C	Celsius
μS.cm ⁻¹	Microsiemens por centímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	SOLOS COLAPSÍVEIS	29
2.1.1	Ocorrência de Solos Colapsíveis.....	31
2.1.2	Estrutura Típica dos Solos Colapsíveis	34
2.2	ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO DA COLAPSIBILIDADE DO SOLO	37
2.2.1	Ensaio Edométrico.....	38
2.2.1.1	Ensaio edométrico simples.....	38
2.2.1.2	Ensaio edométrico duplo	39
2.2.2	Ensaio para Determinar as Características Químicas do Solo e Fluido de Inundação	40
2.2.3	Ensaio de Difração de Raios-X (DRX).....	41
2.2.4	Avaliação da Dispersibilidade de Solo Argiloso Pelo Ensaio de Torrão (Crumb Test).....	42
2.2.5	Condutibilidade Elétrica.....	42
2.3	CRITÉRIOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS	43
2.3.1	Critérios Baseados nos Índices Físicos e Limintes de Atterberg.....	43
2.3.1.1	Critério de Denisov (1951).....	44
2.3.1.2	Critério de Priklonskij (1952) apud Feda (1966)	44
2.3.1.3	Código da U.R.S.S. (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) (1962).....	44
2.3.1.4	Critério de Gibbs e Bara (1967).....	45
2.3.1.5	Critério de Feda (1966)	46
2.3.1.6	Código de obras da U.R.S.S. (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) (1977).....	47
2.3.2	Critérios Baseados em Ensaio Edométrico.....	47
2.3.2.1	Critério de Denisov (1951).....	48
2.3.2.2	Critério de Reginatto & Ferrero (1973)	49
2.3.2.3	Critério de Jennings & Knight (1975).....	50
2.3.2.4	Vargas (1978).....	51

2.3.2.5	Lutenegger & Saber (1988).....	51
2.4	ELETROQUÍMICA DOS SOLOS	52
2.4.1	Dupla Camada Elétrica.....	53
2.5	ESTUDOS EM SOLOS COLAPSÍVEIS	56
3	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1	CARACTERÍSTICAS DO SOLO EM ESTUDO	69
4.2	AMOSTRAGEM	78
4.3	ANALISE QUÍMICA DO SOLO	79
4.4	ANALISE POR DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX).....	79
4.5	AVALIAÇÃO DA DISPERSABILIDADE DE SOLO ARGILOSO PELO ENSAIO DE TORRÃO (CRUMB TEST).....	80
4.6	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	81
4.7	ENSAIO EDMÉTRICO.....	83
4.7.1	Ensaio Edométrico Duplo	85
4.7.2	Ensaio Edométrico Simples.....	85
4.8	FLUIDOS DE INUNDAÇÃO	86
4.9	SÍNTESE DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA	88
5	RESULTADOS.....	91
5.1	ANALISE QUÍMICA DO SOLO	91
5.1.1	Análise Química do Solo Inundados em Diversos Fluidos de Inundação.....	92
5.2	ANALISE POR DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX).....	96
5.3	AVALIAÇÃO DA DISPERSABILIDADE DE SOLO ARGILOSO PELO ENSAIO DE TORRÃO (CRUMB TEST).....	98
5.4	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	100
5.4.1	Condutividade Elétrica do Extrato Aquoso	100
5.4.2	Condutividade Elétrica do Fluido de Inundação	101
5.5	ENSAIO EDMÉTRICO.....	102
5.5.1	Ensaio Edométrico Duplo	104

5.5.1.1	Avaliação do colapso pelos critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg	105
5.5.1.2	Avaliação do colapso pelos critérios baseados em ensaios edométricos duplos	106
5.5.1.3	Avaliação preliminar do colapso pelos critérios baseados nas diferenças das curvas dos ensaios edométricos duplos	107
5.5.2	Ensaio Edométrico Simples.....	111
5.5.2.1	Ensaio edométrico simples inundado com água	111
5.5.2.1.1	<i>Avaliação do colapso quando inundado em água pelos critério baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg</i>	<i>112</i>
5.5.2.1.2	<i>Avaliação do colapso quando inundado com água usando critério baseados nos ensaios edométricos simples</i>	<i>113</i>
5.5.2.2	Ensaio edométrico simples inundado com lixiviado.....	114
5.5.2.2.1	<i>Avaliação do colapso quando inundado com lixiviado pelos critério baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg</i>	<i>114</i>
5.5.2.2.2	<i>Avaliação do colapso quando inundado em lixiviado pelos critério baseados nos ensaios edométricos simples</i>	<i>116</i>
5.5.2.3	Ensaio edométrico simples inundado com solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	117
5.5.2.3.1	<i>Avaliação do colapso quando inundado em solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio usando os critérios dos índices físicos e dos limites de Atteberg.....</i>	<i>117</i>
5.5.2.3.2	<i>Avaliação do colapso quando inundado com solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio pelos critério baseados em ensaios edométricos simples</i>	<i>119</i>
5.5.2.4	<i>Ensaio edométrico simples inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio</i>	<i>120</i>
5.5.2.4.1	<i>Avaliação do colapso quando inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio pelos critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg.....</i>	<i>120</i>
5.5.2.4.2	<i>Avaliação do colapso quando inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio pelos critérios baseados em ensaios edométricos simples</i>	<i>122</i>

5.5.2.5	Resumo da Avaliação do Colapso para os Ensaio Edométricos Simples	123
5.5.3	Avaliação do Potencial do Colapso em Função do pH do Fluido de Inundação.....	128
5.5.4	Avaliação do Potencial do Colapso em Função da Condutibilidade Elétrica do Extrato Aquoso do Solo	129
5.5.5	Avaliação do Potencial do Colapso em Função da Condutibilidade Elétrica do Fluido de Inundação	130
6	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO FENÔMENO DO COLAPSO DO SOLO	132
6.1	ENSAIO EDMÉTRICO DUPLO.....	133
6.2	ENSAIO EDMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 25 KPA.	136
6.3	ENSAIO EDMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 50 KPA	140
6.4	ENSAIO EDMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 100 KPA	145
	CONCLUSÃO.....	150
	REFERÊNCIAS.....	154
	ANEXOS	162
	ANEXO A – Perfil do solo do poço n.º 9 do CEEG – sondagem tipo SPT	163
	ANEXO B – Análise química do solo inundado nos fluidos de interesse	164
	ANEXO C – Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova na umidade natural de campo.....	165
	ANEXO D – Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água desde o início.....	166
	ANEXO E – Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado desde o início.....	167
	ANEXO F – Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) desde o início	168

ANEXO G	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) desde o início	169
ANEXO H	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 25 kPa	170
ANEXO I	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 50 kPa	171
ANEXO J	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 100 kPa	172
ANEXO K	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 25 kPa	173
ANEXO L	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 50 kPa	174
ANEXO M	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 100 kPa	175
ANEXO N	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 25 kPa	176
ANEXO O	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 50 kPa	177
ANEXO P	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 100 kPa	178
ANEXO Q	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 25 kPa.....	179
ANEXO R	– Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 50 kPa.....	180

ANEXO S – Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 100 kPa.....	181
--	-----

1 INTRODUÇÃO

O solo é utilizado na construção civil para inúmeras finalidades, tais como, matéria prima de elementos construtivos e apoio de edificações e obras diversas. As características (físicas, mecânicas, mineralógicas, químicas, entre outras) do solo podem interferir nas soluções de projeto ou até mesmo na vida útil das obras, por exemplo, fundações, canais, aterros, taludes, barragens, tuneis, tubulações hidrossanitárias, galerias pluviais, entre outros. Portanto é necessário estudar o comportamento físico e mecânico do solo.

O Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina foi criado em 1998 motivado pela busca de conhecimento científico dos solos de Londrina, visando compreender o comportamento específico do solo desta região. A partir de investigações realizadas no CEEG a camada de solo até 7 metros de profundidade é composta por uma argila porosa laterítica que apresenta índice de vazios próximo a 2; massa específica dos sólidos próxima a 3; visível agregação; granulometria de argila siltosa quando se usa um defloculante no ensaio para obter a composição granulométrica e sem o uso de um defloculante passa a exibir granulometria de silte arenoso; permeabilidade 10^{-3} a 10^{-5} cm/s obtida de ensaio de infiltração em campo e potencialmente colapsível, avaliado por meio de ensaios de laboratório e campo (BRANCO *et al.*, 1998; LOPES, 2002; MIGUEL *et al.*, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2004; TEIXEIRA *et al.*, 2006 e TEIXEIRA *et al.*, 2008). Os solos superficiais (até 2 metros), do Campus Universitário da UEL, foram caracterizados por ROCHA *et al.* (1991) como Latossolo Roxo Distrófico com mineralogia da fração argila compreendida por caulinita, gibsitita e vermiculita, além de óxidos de ferro (hematita).

Alguns solos apresentam redução brusca do volume do solo, representada pela diminuição do índice de vazios, geralmente devido ao aumento do teor de umidade sem que haja necessariamente o aumento de sobrecarga. Este fenômeno é chamado de colapso. (CINTRA, 1998)

Em um solo potencialmente colapsível, suas partículas são mantidas em uma posição estruturalmente estável pela presença de vínculos capazes de conferir ao solo uma resistência adicional. Esse estado de equilíbrio permanece enquanto nenhum agente externo intervir no sentido de diminuir a resistência adicional e temporária adquirida pelo solo.

A maior parte dos impactos diretos que ocorrem como consequência do processo de colapso de solos são perdas econômicas, que correspondem à recuperação das obras afetadas, sendo mais comuns os problemas com alvenaria, portas e janelas e nas redes de água e de esgoto (LOLLO, 2008).

Algumas obras apresentam além dos reparos, custos adicionais referentes à perda de materiais por vazamento, possibilidade de incêndios e explosões, que podem aumentar significativamente as perdas materiais e até mesmo perda de vidas, sendo esse o caso de dutos de transporte de matérias primas, combustíveis e gás e também nas obras viárias e de canais, ocasionando a instabilidade de taludes, obras auxiliares.

Além das perdas diretamente relacionadas à ocorrência do colapso, outros prejuízos podem acontecer como consequência indireta do processo (LOLLO, 2008). No caso de edificações, o processo do colapso pode causar desvalorização imobiliária, além de representar riscos para as redes hidráulicas e elétricas, e de acordo com a função desenvolvida na edificação, a contaminação do subsolo. Quando ocorre a ruptura das redes de água e de esgoto e o colapso do solo de canais, dutos e obras viárias, os impactos indiretos mais comuns são a poluição e contaminação do subsolo, erosão em maciços de terra, risco de ruptura de taludes e possibilidade de recorrência de recalques, atingindo áreas vizinhas.

Em edificações, o aconselhável é que sejam realizadas, no local da obra, investigações geotécnicas e/ou ensaios de laboratório que permitam identificar a existência de colapso dos solos da área, ou até mesmo a inexistência deste fenômeno, considerando as cotas de apoio dos elementos de fundação e a distribuição espacial destas camadas de solo na área. Dessa forma é possível se determinar qual é o tipo de fundação que melhor se adéqua tanto ao terreno quanto ao tipo de edificação (OLIVEIRA & LOLLO, 2002).

O estudo do colapso do solo permite adotar soluções apropriadas para projetos de engenharia, tais como, taludes, base de aterros sanitários e valas, fundações, canais, túneis, entre outras obras de construção civil, de modo que não ocorram prejuízos ou gastos com recuperação das obras de engenharia. As soluções para esse fenômeno podem ser diversas, como por exemplo, aprofundamento da fundação, compactação de bases de aterros, compactação e fundos de valas, que dependerão basicamente do índice de colapso e do tipo de projeto de engenharia que será realizado.

O potencial de colapso pode ser aumentado dependendo do fluido de inundação que satura o solo. Isto ocorre devido às interações químicas entre o solo e o líquido de inundação, influenciando assim no comportamento tensão versus deformação do solo. Estes fluidos podem ser provenientes de vazamentos em reservatórios de combustíveis, tubulações de esgoto doméstico e industrial, além das chuvas intensas.

Portanto a magnitude do colapso do solo está diretamente ligada às características físico – químicas do fluido de inundação. Estas características tendem a alterar as características do solo quando entram em contato com ele, tais como a CTC, o pH, a condutibilidade elétrica do extrato aquoso, entre outras. Estas modificações no solo tende a alterar o seu potencial do colapso, devido fluido de inundação possuir certas características que se inclinam a influenciar neste potencial, sendo essas o pH, a concentração do fluido de inundação e a condutibilidade elétrica do fluido de inundação. Esta última parece ser um dos parâmetros que mais contribui para a magnitude do colapso do solo, assim como constatado nos estudos de Motta & Ferreira, (2011), Collares (2002) e Mariz & Casanova (1994).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do fluido de inundação no comportamento colapsível do solo da camada porosa superficial da região de Londrina/PR. Esta avaliação foi realizada utilizando quatro fluidos distintos para a inundação, através da execução em laboratório, de ensaios edométricos duplos e simples, usando amostras indeformadas do solo estudado. Foram avaliadas as interações físico-químicas entre o solo e os fluidos de inundação e seu efeito no fenômeno do colapso do solo. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização química e mineralógica do solo, e ensaios de condutibilidade elétrica do extrato aquoso do solo e do fluido de inundação, e as características químicas do fluido de inundação.

Os ensaios edométricos simples (inundados em diferentes tensões) e duplos foram realizados para confirmar a existência de colapso e a sua magnitude. Os demais ensaios foram realizados para avaliar a interação físico-química entre o solo e o fluido de inundação e a sua relação com o fenômeno do colapso do solo.

No desenvolvimento do trabalho percebeu-se que o mecanismo do colapso está correlacionado a diminuição brusca do volume do solo, devido a uma redução significativa do índice de vazios, após do aumento do grau de saturação em

determinados níveis de carga. Também foi possível constatar que o fluido de inundação interfere no potencial de colapso, para a mesma carga, e que este está relacionado com o pH e condutividade elétrica do fluido.

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, sendo o Capítulo 2 destinado a uma síntese de revisão bibliográfica. O Capítulo 3 apresenta uma breve caracterização geotécnica da área de estudo.

Os materiais e métodos utilizados para a obtenção dos resultados laboratoriais estão retratados no Capítulo 4. Neste Capítulo, também, estão descritos as características físicas do solo usado e coletado a 2 metros de profundidade na área do CEEG/UEL. Algumas destas características servirão de base para a avaliação do colapso.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos e uma avaliação preliminar. As avaliações do efeito do fluido de inundação no colapso do solo serão apresentadas no Capítulo 6. Por fim, no Capítulo 7 as conclusões e as sugestões para futuras pesquisas nessa mesma linha de pesquisa estarão apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS COLAPSÍVEIS

O solo é um material resultante da degradação da rocha que o originou, constituído de um conjunto de partículas sólidas, líquidas (geralmente água) e gasosas. A fase sólida pode variar de tamanho e forma e é ela quem irá caracterizar o solo. As demais fases são as partes que constituem o material presente nos poros do solo (partículas líquidas e gasosas). Portanto, os solos são agregados de partículas minerais que juntas com o ar e a água nos seus vazios formam um sistema de três fases. A forma como está disposto este conjunto de partículas é chamado de estrutura do solo.

A estrutura do solo é, portanto, uma característica física determinada pela forma, tamanho e mineralogia das partículas de solo e o arranjo entre estas partículas e os vazios que se associam a elas. Estes arranjos são formado pela agregação de partículas primárias (areias, siltes e argilas) com outros componentes minerais e orgânicos. A agregação é resultado da atração entre as partículas de solo e os agentes cimentantes (devido às forças eletrostáticas – força de Van der Waals). Esta agregação forma diferentes unidades estruturais, denominadas macroestrutura (estruturas visíveis à vista desarmada) e microestrutura (somente podem ser vistas com auxílio de microscópio). Conforme a organização dessas unidades estruturais, podem se formar solos de estruturas e características distintas. (MEURER, 2004; DAS, 2013; CAPECHE, 2008).

Os solos apresentam-se normalmente em duas condições em relação à presença de água: saturados ou não saturados. A primeira entende-se que o solo é composto por partículas de solo e água em todo o seu preenchimento, na segunda condição têm-se as partículas de solo, água e ar nos vazios.

Os solos compostos por uma estrutura não saturada em alguns casos se caracterizam por sofrerem uma redução brusca do volume do solo, representada pela diminuição do índice de vazios, geralmente devido ao aumento do teor umidade, sob tensões totais praticamente constantes, o que gera um colapso da estrutura do solo, e estes solos são denominados colapsíveis (CINTRA, 1998).

O mecanismo do colapso difere do processo do adensamento, pois no adensamento o recalque ocorre com a expulsão de água do interior dos vazios

do solo devido à ação de sobrecarga, já o colapso ocorre como resultado de acréscimo do teor da umidade onde ocorre a expulsão de ar da estrutura do solo. Sendo assim, pode-se afirmar que o recalque por adensamento se dá de gradativa e o colapso se manifesta de forma brusca e repentina (VILAR & MACHADO, 1997; VILAR *et al.*, 1998; LOLLO, 2008).

Os solos potencialmente colapsíveis se caracterizam por apresentarem altos índices de vazios, baixo grau de saturação e que, por um processo de umedecimento, sofrem deformações adicionais repentinas e de grandes proporções, solicitado por tensões totais praticamente constantes.

Jennings e Knight (1957) fornecem uma hipótese para o fenômeno do colapso: a estrutura de um solo colapsível ao ser carregado, no seu teor de umidade natural, comprime suavemente, sem variação sensível de volume, resistindo aos esforços de compressão entre os grãos, sem grandes movimentos relativos entre eles. Porém, quando este solo carregado ganha umidade e alcança em teor de umidade crítico, os vínculos de resistência enfraquecem e a estrutura colapsa (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Estrutura do solo carregado: a) antes da inundação; b) após a inundação.



Fonte: Jennings e Knight (1957) *apud* Gutierrez (2005, p. 31)

A tensão de sucção (forças capilares e de adsorção) representa uma parcela da tensão efetiva a que o solo está sendo submetido, na condição de parcialmente saturado. Quando saturado os meniscos capilares se desfazem e a tensão efetiva diminui. Ocorre, portanto, que a redução da tensão de sucção provoca um enfraquecimento das ligações entre as partículas e pequenos escorregamentos entre elas, gerando uma macrocompressão (DUDLEY, 1970; NUÑES 1975 *apud* GUTIERREZ, 2005, SOUZA PINTO, 2006).

Segundo Dudley (1970) os grãos ou microagregações são mantidos estáveis pela presença de sucção ou agente cimentante (óxidos, hidróxidos de ferro

e/ou alumínio e carbonatos). Quando umedecidos estas forças estabilizadoras da estrutura do solo perdem intensidade, possibilitando o deslocamento relativo entre as partículas, de modo que estas passam a ocupar os espaços vazios da estrutura do solo.

Barden *et al.* (1969) e Lawson *et al.* (1992) *apud* Feurharmel (2004) consideram quatro condições fundamentais para ocorrer o colapso de um solo:

- (1) existência de uma estrutura porosa, parcialmente saturada e potencialmente instável;
- (2) uma tensão existente ou aplicada suficiente para desenvolver uma condição metaestável;
- (3) uma forte presença de sucção ou agente cimentante capaz de estabilizar os contatos intergranulares e que são susceptíveis de enfraquecimento quando umedecidos e;
- (4) adição de água no solo suficiente para destruir os vínculos que mantêm a estrutura em equilíbrio, causando o colapso.

Os solos colapsíveis apresentam elevado índice de vazios (o que determina a sua estrutura porosa) e baixo teor de umidade (menor que o necessário para a sua saturação). Sendo assim, as obras civis implantadas em solos colapsíveis podem se comportar satisfatoriamente durante algum tempo, mas mudanças nas condições de umidade do solo acarretam modificações indesejáveis de seu comportamento e comprometimento das mesmas como, por exemplo, o surgimento de trincas e rachaduras nas construções (nas alvenarias, pisos, entre outros elementos construtivos), ruptura de aterros, deslizamento de taludes, danos em pavimentos, colapso das fundações, comprometimento de vigas e pilares, rompimento de redes de água e esgoto, entre outros.

As causas mais frequentes de inundação do solo ocorrem por ruptura de condutos de água ou esgoto, infiltração de água de chuva, fissuras e trincas em reservatório enterrado e ascensão de lençol freático.

2.1.1 Ocorrência de Solos Colapsíveis

Os solos colapsíveis são encontrados comumente em muitas partes do mundo e em solos com diferentes origens geológicas e climáticas, como solos de

origem aluvionar, eólica, coluvionar, residual e solos tropicais (FEUERHARMEL, 2004).

Em regiões áridas e semiáridas, com longos períodos de seca seguido por curtos períodos de chuvas intensas, existem as condições ideais para a ocorrência e formação de solos colapsíveis. Estas regiões se caracterizam por climas quentes onde é mais comum a formação de solos colapsíveis.

Solos colapsíveis também são encontrados em regiões de clima tropical onde os processos de intemperismo atuam intensamente e o resultado é a formação de solos com espessura superiores a 5 metros, como é o caso dos Latossolos, que recobrem cerca de 50% do território brasileiro. Nestes casos, os solos colapsíveis ocorrem em depósitos aluviais, coluviais e residuais muito lixiviados, e até em aterros mal compactados onde são usados solos provenientes de intenso intemperismo.

Os possíveis processos de formação para solos colapsíveis, os quais já foram citados por Dudley (1970), Collares (2002), Gutierrez (2005), Rodrigues (2007), Lollo (2008), são:

- a) Depósitos Residuais: sua origem se dá pela ação de degradação e alteração da rocha sã, provocada pela ação do intemperismo. Estes solos possuem partículas dos mais variados tamanhos, variando desde matacões e pedregulhos até argilas e coloides. Estes perfis de solos são potencialmente colapsíveis devido à lixiviação das camadas superficiais, o que gera solos extremamente porosos e de baixa massa específica.
- b) Depósitos de origem aluvial: consistem nos depósitos de partículas formados a partir da ação da água e dos formados por corrida de lama (*"mud flow"*). Este tipo de solo é encontrado em regiões que apresentam curtos períodos de chuvas intensa, alternados por longos períodos de seca. Esses depósitos são formados por material mal consolidado, com elevado índice de vazios, baixo peso específico e considerável teor de argila.
- c) Depósitos Eólicos: sua formação se dá pelo depósito de grãos de areia e/ou silte pela ação do vento, dando origem a solos de baixa coesão, elevado índice de vazios, e baixo peso específico.

Além da areia e/ou silte são depositadas partículas finas de argila, que envolvem os grãos maiores. Na ausência de chuvas a água intersticial é evaporada, gerando tensões capilares. Essas tensões formam uma cimentação entre os grãos que permitem que o solo tenha uma resistência temporária, porém, quando inundados, apresentam comportamento colapsível.

- d) Aterros Compactados: a compactação é um fenômeno mecânico que confere ao solo uma diminuição do índice de vazios e da permeabilidade, e um aumento na resistência ao cisalhamento, porém, quando este processo não é realizado corretamente o solo compactado pode sofrer colapso.

Na Figura 2.2 é apresentado um mapa do Brasil mostrando alguns locais de ocorrência dos solos colapsíveis.

Figura 2.2 – Solos colapsíveis estudados no Brasil.



Fonte: Rodrigues (2003) modificado por Manso (2011, p. 12)

2.1.2 Estrutura Típica dos Solos Colapsíveis

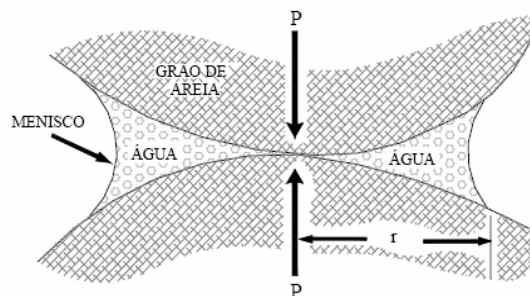
Para que ocorra o fenômeno do colapso no solo é necessário que ele apresente uma estrutura macroporosa, onde as partículas maiores se mantêm em equilíbrio metaestável pela presença de um vínculo (cimentação e/ ou tensão capilar) capaz de proporcionar ao solo uma resistência adicional temporária. O colapso do solo ocorre quando as tensões cisalhantes (geradas a partir do aumento do valor de umidade ou estado de tensões) são maiores que as resistências dos vínculos entre as partículas (DUDLEY, 1970 E NUÑES, 1975 *apud* COLLARES, 2002; JENNINGS E KNIGHT, 1957).

Segundo Lollo (2008) os principais fatores que fornecem ao solo uma “resistência temporária são as forças eletromagnéticas de superfície, a sucção e a presença de alguma substância cimentante, como óxido de ferro e os carbonatos”.

A estrutura típica dos solos colapsíveis e os fatores que conferem ao solo uma resistência temporária são ilustrados abaixo:

- a) Tensões capilares: A água intrínseca entre os grãos devido ao processo de secagem do solo (Figura 2.3) gera tensões capilares, que mantêm a estrutura estável conferindo resistência ao cisalhamento e à deformação, por resultar em uma tensão efetiva superior a tensão total, o que aumenta a resistência aparente do solo. Quando ocorre entrada de fluido nesta estrutura as tensões geradas pela capilaridade são destruídas e como consequência o solo pode sofrer colapso.

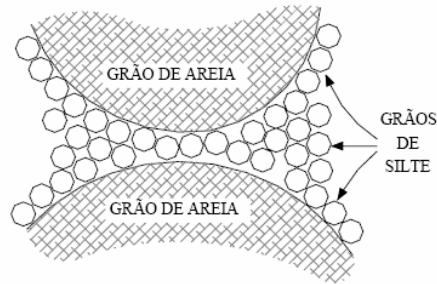
Figura 2.3 – Estrutura metaestável sustentada por pressões capilares.



Fonte: Dudley (1970) *apud* Lollo (2008, p. 67).

- b) Vínculos de silte: a resistência temporária é conferida ao sistema devido a uma estrutura que é mantida estável pelas tensões capilares que agem entre os contatos dos grãos de silte e entre os contatos dos grãos de silte e de areia. Conforme o arranjo ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Estrutura metaestável sustentada por pressões capilares.

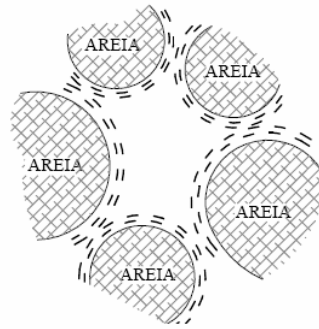


Fonte: Dudley (1970) *apud* Lollo (2008, p. 67).

- c) Vínculos de areia: neste tipo de estrutura os grãos maiores (as areias) são ligados por partículas menores (argilas, e eventualmente siltes). Neste caso a resistência temporária é conferida ao solo devido às forças de *Van der Waals*, de osmose e de atração molecular. Esses vínculos podem ser formados por autogênese ou por transporte, que conferem características distintas às estruturas resultantes.

No processo de autogênese a alteração do feldspato pelo intemperismo forma uma camada fina de argila cobrindo os grãos de areia (Figura 2.5). Em baixos teores de umidade, essa estrutura apresenta considerável resistência ao cisalhamento.

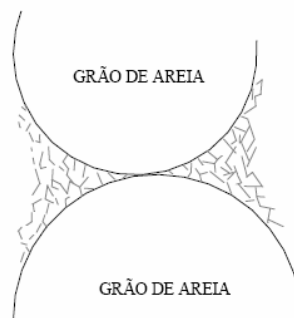
Figura 2.5 – Estrutura metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.



Fonte: Dudley (1970) *apud* Lollo (2008, p. 71).

- d) Em locais de pequenas precipitações algumas partículas de argila podem ficar dispersas no fluido intersticial, e devido ao efeito do movimento Browniano essas partículas se mantêm uniformemente distribuídas. Quando a água evapora ocorre um agrupamento dessas partículas nos espaços existentes entre os grãos maiores, formando um arranjo floculado aleatório, devido à alta concentração de íons dissolvidos no fluído intersticial remanescente. Nesse caso, os contrafortes ou pontes de argila sustentam os grãos maiores, pois na estrutura formada prevalecem as forças de superfície (Figura 2.6), podendo também existir tensões capilares.

Figura 2.6 – Estrutura metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.

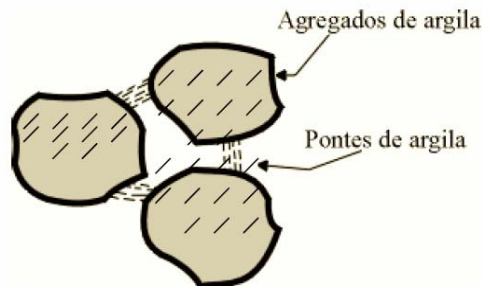


Fonte: Dudley (1970) *apud* Lollo (2008, p. 71).

- e) Vínculos de argila: segundo Clemence e Finbarr (1981) *apud* Gutierrez (2005) é possível ainda que existam agentes cimentantes que confirmam ao sistema uma resistência temporária formada por agregados de argila interligados por pontes de argila

(Figura 2.7). Os agentes cimentantes deste sistema podem ser os óxidos de ferro, carbonatos de cálcio, silicatos, aluminatos, gipsita e sais que conferem ao sistema uma estrutura mais densa. A perda da resistência e a magnitude do colapso estão diretamente ligadas ao tipo de fluido que irá adentrar a estrutura do solo e o material cimentante envolvido.

Figura 2.7 – Estrutura metaestável sustentada por forças eletromagnéticas.



Fonte: Clemence e Finbarr (1981) *apud* Gutierrez (2005, p. 44).

2.2 ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO DA COLAPSIBILIDADE DO SOLO

É possível identificar a colapsibilidade do solo através de ensaios de campo e laboratório, nos quais podem se observar resultados qualitativos e quantitativos através de alterações no teor de umidade e das cargas aplicadas no sistema. Segundo Gutierrez (2005) nos ensaios que buscam verificar a existência do colapso no solo são analisadas informações que visam obter dados quantitativos e que permitem estimar a magnitude dos recalques.

Os solos da região de Londrina, solo objeto deste estudo, assim como grande parte da região sul-sudeste e centro-oeste do país, são originários do basalto que compõe o planalto sul do Brasil. Estes solos possuem uma estrutura altamente porosa, com baixo teor de umidade e com potencial altamente colapsível. Ensaio de laboratório são usados para obter dados qualitativos e quantitativos do fenômeno do colapso do solo.

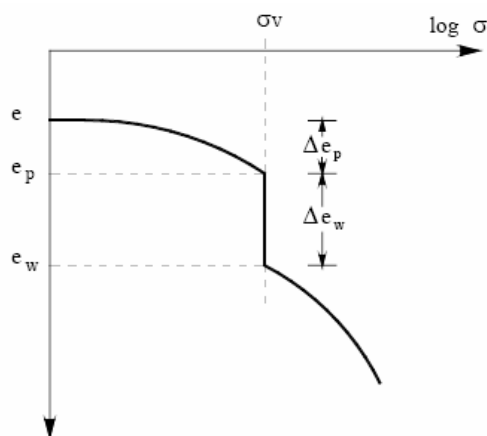
2.2.1 Ensaios Edométricos

O ensaio edométrico é o mais empregado para a verificação da colapsibilidade de um solo em laboratório. Os parâmetros obtidos neste ensaio levam em consideração as deformações axiais provocadas pela inundação dos corpos de prova sob um estado de tensão e as deformações axiais provocadas pelo acréscimo de tensões, podendo ser realizado de duas formas: ensaio simples ou ensaio duplo. Com os dados do ensaio edométrico é elaborada uma curva dos índices de vazios do solo *versus* logaritmo das tensões aplicadas (curvas e x $\log \sigma$).

2.2.1.1 Ensaio edométrico simples

No ensaio edométrico simples, molda-se um corpo de prova com o teor de umidade de campo. Este corpo de prova é solicitado até uma tensão de interesse e posteriormente inundado. Com a inundação do corpo de prova a curva de compressão confinada poderá apresentar uma descontinuidade. A partir desta descontinuidade conclui-se que ocorreu um colapso estrutural do solo (Figura 2.8). Após a estabilização das deformações induzidas pela saturação, o corpo de prova é submetido a carregamentos progressivos até o término do ensaio.

Figura 2.8 – Curva típica do ensaio edométrico simples mostrando uma descontinuidade.



Fonte: Lollo (2008, p.143).

Onde: e = índice de vazios inicial, e_p = índice de vazios devido ao carregamento, e_w = índice de vazios final devido à inundação do corpo de prova, Δe_p

= variação do índice de vazios devido ao carregamento, Δe_w = variação do índice de vazios devido à inundação do corpo de prova.

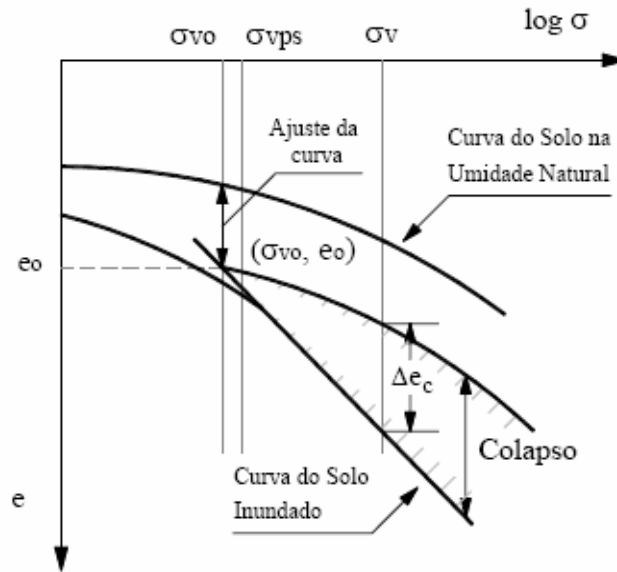
Uma das vantagens do ensaio edométrico simples em relação ao ensaio edométrico duplo é a eliminação dos problemas relacionados a variabilidade do solo como o teor de umidade e o índice de vazios, dos corpos de prova antes do início dos ensaios.

2.2.1.2 Ensaio edométrico duplo

O ensaio edométrico duplo consiste em moldar dois corpos de prova idênticos, moldados a partir do mesmo bloco de solo indeformado, considerando que eles possuem características físicas e mecânicas semelhantes, para serem ensaiados. O primeiro ensaio é realizado com o corpo de prova de solo na umidade de campo (nas condições não saturadas) e outro totalmente inundado desde o início do ensaio (na tentativa de saturação). Neste ponto é possível se deparar com a maior dificuldade deste tipo de ensaio que é talhar dois corpos de prova idênticos, já que “durante o processo de talhagem pode ocorrer perturbação da amostra, alterando as condições de campo, além do problema de heterogeneidade dos corpos de prova” (GUTIERREZ, 2005).

Após a montagem da prensa de adensamento, aplicam-se carregamentos progressivos para a obtenção de medidas de deformação axial em ambas as amostras. Com o término dos ensaios, duas curvas $e \times \log \sigma$ (índice de vazios *versus* logaritmo da tensão) são obtidas (Figura 2.9). As curvas obtidas apresentam-se deslocadas, o que é considerado comum devido à heterogeneidade das características físicas iniciais, principalmente o índice de vazios, dos corpos de prova.

Figura 2.9 – Curvas de adensamento para a umidade de campo e inundado desde o início.



Fonte: Lollo (2008, p.142).

Onde: e_0 = índice de vazios devido ao peso próprio, σ_{v0} = tensão vertical devido ao peso próprio, Δe_c = variação do índice de vazios devido à inundação do corpo de prova.

Para se resolver este problema de deslocamento é comum se fazer um ajuste das curvas, por meio da normalização das mesmas, em que os índices de vazios finais, para cada estágio de carga, são divididos pelo índice de vazios inicial (e_f/e_i) da amostra de solo. Com isso, as curvas partem do mesmo índice de vazios inicial (e_f/e_i) podendo desta maneira comparar as curvas obtidos. A diferença entre as duas curvas, representada pela diferença do índice de vazios para mesma carga, pode ser considerada como sendo o potencial de colapso do solo.

2.2.2 Ensaio para determinar as características químicas do solo e fluido de inundação

Através dos ensaios químicos é possível obter os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e alumínio (Al), extraídos com KCl e pH determinado com CaCl_2 . Como também é determinada a soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases e saturação por alumínio.

O cálcio, o magnésio, o potássio e alumínio são macronutrientes do solo, é necessário determiná-los por fazerem parte dos elementos trocáveis de maior

relevância no solo, o sódio é um dos elementos de maior importância no complexo coloidal de solos salinos e alcalinos a extração dos macronutrientes por KCl é importante para determinar as propriedades de absorção de sódio e a porcentagem de sódio trocável. (CAMARGO *et al.* (1986))

O pH expressa as condições de acidez e alcalinidade de uma solução, através dele é possível conhecer a concentração de íons de hidrogênio, ou seja, a atividade dos íons de hidrogênio. A determinação do pH em solução de CaCl_2 é realizada para reduzir o efeito sazonal de sais que interferem nas medidas de pH do solo. (RAIJ (1986) APUD NOLLA & ANGHINONI (2004)).

As características químicas do fluido de inundação também devem ser obtidas, pois somente a partir destes dados podem ser realizadas análises consistentes das interações físico-químicas que ocorrem entre o solo e o fluido de inundação.

Conforme Carvalho (1994) a partir dos ensaios químicos é possível determinar parâmetros relevantes, tais como, a quantidade de cátions solúveis, o pH, a capacidade de troca catiônica, a taxa de absorção de sódio e os íons absorvidos no fluido, entre outros dados que forem de interesse.

Nos estudos sobre o colapso do solo muitos pesquisadores afirmam que é preciso determinar a química do solo e do fluido de inundação para correlacionarem o conjunto de propriedades obtidas através desta análise com o potencial do colapso, tais como, a taxa de absorção de sódio, a porcentagem de sódio trocável, o pH, o tipo de solo e a concentração de sais dissolvidos nos fluidos de inundação (CAMAPUM DE CARVALHO, 1987; COLLARES, 2002; GARCIA *et al.*, 2004; RODRIGUES, 2003; RODRIGUES *et al.*, 2010; RODRIGUES & LOLLO, 2007; MOTA & FERREIRA, 2011; CONCIANI & BARBOSA, 2013).

2.2.3 Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)

Para o estudo de solos colapsíveis é importante conhecer a composição mineralógica do solo a ser estudado. Esta informação auxilia na compreensão da estrutura do solo por haver correlação entre os tipos de minerais presentes no solo e a sua colapsibilidade.

As análises do ensaio de difração de raios-X são as mais utilizadas para o conhecimento da composição mineralógica do solo (REGINATTO &

FERRERO, 1973; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 1987; CARVALHO, 1994; GUTIERREZ, 2005).

A natureza do fluido de saturação e a composição mineralógica do solo são relevantes para o estudo de solos colapsíveis. Esta afirmação pode ser constatada em Collares (2002) e Gutierrez (2005).

2.2.4 Avaliação da Dispersabilidade de Solo Argiloso Pelo Ensaio de Torrão (*Crumb Test*)

O ensaio de dispersão do solo é realizado com o intuito de classificar o solo em dispersivo ou não dispersivo. Dos resultados desse ensaio é realizada uma correlação entre o comportamento do solo nos ensaios edométricos simples e duplo e o seu grau de dispersabilidade. A dispersabilidade é avaliada a partir de um torrão de solo indeformado imerso em uma solução, após a inundação do torrão é observado se a solução apresentará uma nuvem, e quanto mais forte a presença da nuvem mais dispersivo é o solo (NBR 13601/1996).

A avaliação da dispersabilidade do solo fornece um parâmetro que auxilia na avaliação da influência do fluido de inundação na magnitude do colapso do solo, já que diferentes fluidos de inundação podem acrescentar as partículas de solo uma maior ou menor facilidade de dispersar.

Alguns estudos levam em consideração a influência deste fenômeno no colapso do solo, tais como, Collares (2002) e Gutierrez (2005).

2.2.5 Condutibilidade Elétrica

Este parâmetro pode ser analisado tanto no solo como no fluido de inundação. No solo a constante elétrica permite avaliar indiretamente a concentração de íons solúveis presentes no solo. Já no fluido de inundação permite medir a facilidade com que o fluido é capaz de interagir com um campo elétrico. No estudo do colapso do solo esta facilidade de interagir do fluido de inundação com o campo elétrico do solo pode assim alterar sua magnitude. (CASANOVA, 1989 *APUD* COLLARES, 2002; COLLARES, 2002; MITCHELL, 1976).

Alguns trabalhos já foram realizados para analisar a influência da condutividade elétrica no colapso do solo, e os resultados obtidos indicam que

quanto maior a condutividade elétrica maiores serão os potenciais de colapso no solo (COLLARES, 2002; FARIA *et al.*, 2003; MOTTA & FERREIRA, 2011). Por isso a medida de condutividade elétrica auxilia no entendimento do fenômeno do colapso do solo, ou seja, é considerado um dos fatores que pode estar correlacionado a magnitude do colapso.

2.3 CRITÉRIOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS

O colapso do solo pode ser avaliado por critérios baseados em índices físicos, Limites de Atterberg, ensaios de Campo e ensaios de laboratório. Esses critérios foram sendo desenvolvidos e aprimorados nos últimos anos para que o estudo dos solos colapsíveis pudesse ser realizado tanto nos campos experimentais como em laboratórios. Cada critério é baseado em grandezas físicas diferentes e tem o objetivo de qualificar (critérios baseados em índices físicos e Limites de Atterberg) ou quantificar (critérios baseados em ensaios de campo e laboratório) o colapso do solo (FEDA, 1966; GIBBS & BARA, 1967; DUDLEY, 1970; REGINATTO & FERRERO, 1973; JENNINGS & KNIGHT, 1975; VILAR, 1979; LUTENEGGER & SABER, 1988).

Porém é preciso avaliar os critérios com cuidado, pois cada um foi criado especificamente para o tipo de solo do local de onde foram derivados.

2.3.1 Critérios Baseados nos Índices Físicos e Limites de Atterberg

Os critérios baseados nos Índices Físicos e Limites de Atterberg fornecem somente dados qualitativos, pois não levam em consideração as tensões aplicadas, portanto não fornecem dados sobre a magnitude do colapso. Para obter esses dados qualitativos são usados os limites de Atterberg (limite de plasticidade, limite de liquidez), porosidades, umidades, pesos específicos e o grau de saturação. Nestes critérios somente é possível classificar se o solo é colapsível ou não.

2.3.1.1 Critério de Denisov (1951)

Neste critério existe uma relação entre os índices de vazios que definem um coeficiente de subsidência (K) em função do índice de vazios no estado natural (e_0) e o índice de vazios no estado do limite de liquidez (e_L).

$$K = \frac{e_L}{e_0} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde os solos são classificados em:

$0,5 < K < 0,75 \rightarrow$ Solos altamente colapsíveis

$0,75 < K < 1,5 \rightarrow$ Margas não colapsíveis

$1,5 < K < 2,0 \rightarrow$ Solos não colapsíveis

2.3.1.2 Critério de Priklonskij (1952) *apud* Feda (1966)

Este critério define um coeficiente K_d (Equação 2), em função dos limites de Atterberg (limite de liquidez: LL; limite de plasticidade: LP) e do teor de umidade de campo (w_0).

$$K_d = \frac{LL - w_0}{LL - LP} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde os solos são classificados em:

$K_d < 0$ – Solos altamente colapsíveis

$K_d \geq 0,5$ – solos não colapsíveis

$K_d > 1$ – Solos expansivos

2.3.1.3 Código da U.R.S.S. (*União das Repúblicas Socialistas Soviéticas*) (1962)

De acordo com Northey (1969) *apud* Feda (1966) este critério define um coeficiente (λ) em função do índice de vazios no estado natural (e_0) e o índice de vazios no estado do limite de liquidez (e_L).

$$\lambda = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 3})$$

Este critério é aplicado para solos com grau de saturação menor ou igual a 60%, onde os solos são classificados em:

$$\lambda \geq -0,1 \rightarrow \text{colapsíveis}$$

$$\lambda \geq -0,3 \rightarrow \text{expansivos}$$

2.3.1.4 Critério de Gibbs e Bara (1967)

Critério baseado no teor de umidade para 100% de saturação do solo (w_{sat}) e no limite de liquidez (LL), eles definiram o coeficiente de subsidência R.

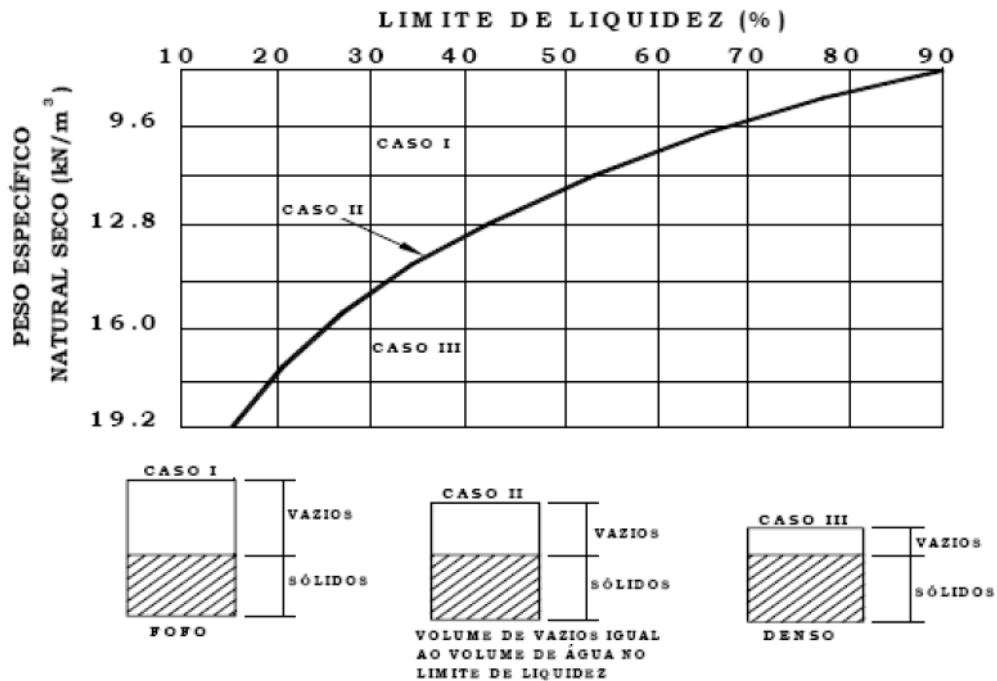
$$R = \frac{w_{sat}}{LL} \quad (\text{Equação 4})$$

O solo é considerado colapsível quando o coeficiente $R > 1,0$. A Equação 4 pode ser reescrita, resultando na Equação 5.

$$R = \frac{\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right) - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s}\right)}{LL} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde γ_w é o peso específico da água, γ_d é o peso específico do solo seco, γ_s é o peso específico dos sólidos e LL é o limite de liquidez, sendo sua identificação baseada em uma análise gráfica de diferentes situações. Para essa análise é utilizado o gráfico da Figura 2.10.

Figura 2.10 – Critério de identificação da colapsibilidade de solos.



Fonte: Gibbs e Bara, (1962) *apud* Lollo, (2008, p.139).

- Caso I: Solo fofo, o volume de vazios é maior que o necessário para conter o volume de água correspondente ao teor de umidade no limite de liquidez. Pode ser saturado até o ponto em que ele não apresenta plasticidade e nem resistência, tornando-o totalmente propício ao colapso.
- Caso II: representa a condição limite, em que o volume de vazios é igual ao volume de água no limite de liquidez, sendo utilizado para traçar o gráfico da Figura 10.
- Caso III: estado intermediário no qual o volume de vazios é igual ao volume de água correspondente ao teor de umidade no limite de liquidez. Quando saturado, apresentará um comportamento plástico dessa forma não é sujeito ao colapso.

2.3.1.5 Critério de Feda (1966)

Critério aplicado a solos parcialmente saturados que propõe uma expressão que prevê o colapso (Equação 6), utilizando os limites de Atterberg (limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP)), a umidade de campo (w_0) e o grau de saturação de campo (S_0).

$$K = \frac{\left(\frac{w_0}{S_0}\right) - LP}{LL - LP} \quad (\text{Equação 6})$$

Segundo este critério para solos parcialmente saturados com $K > 0,85$ são considerados como solos subsidentes e para solos com grau de saturação (S_0) menor que 60% são considerados como solos colapsíveis.

2.3.1.6 Código de obras da U.R.S.S. (*União das Repúblicas Socialistas Soviéticas*) (1977)

Segundo este critério o solo pode ser considerado como potencialmente colapsível quando seu grau de saturação for menor que 80% e o coeficiente (CI) for menor que os valores contidos na Tabela 2.1.

$$CI = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo que e_0 é o índice de vazios no estado natural e e_L é o índice de vazios no estado do limite de liquidez.

Tabela 2.1 – Coeficiente de colapsibilidade (CI)

Índice de Plasticidade	CI
$1 \leq IP \leq 10$	0,10
$10 \leq IP \leq 14$	0,17
$14 \leq IP \leq 22$	0,24

Fonte: Código de obras U.R.S.S., (1977) *apud* Lollo (2008, p. 140).

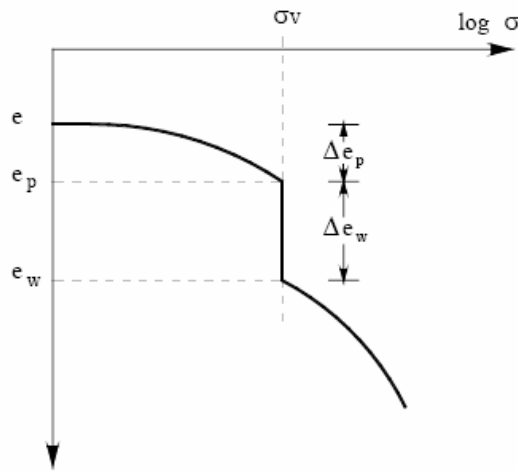
2.3.2 Critérios Baseados em Ensaio Edométricos

Critérios baseados em ensaios edométricos simples ou duplos são realizados a partir de amostras indeformadas. Estes critérios levam em consideração a estrutura do solo no seu estado natural de campo e com isso são obtidos não somente dados qualitativos, mas também informações quantitativas, visto que esses critérios levam em consideração as tensões aplicadas no solo, portanto fornecem dados sobre a magnitude do colapso no solo.

2.3.2.1 Critério de Denisov (1951)

Denisov (1951) *apud* Lollo (2008) propõe um critério baseado no ensaio edométrico simples, com inundação por estágio de carregamento, definindo um coeficiente de subsidência (R) para o solo. Este coeficiente é proposto para várias situações (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Curva de compressão confinada do ensaio edométrico simples.



Fonte: Lollo (2008, p.143).

Coeficiente de subsidência devido à inundação (R_w):

$$R_w = \frac{e_p - e_w}{1 + e_p} \quad (\text{Equação 8})$$

Coeficiente de subsidência devido ao carregamento (R_p):

$$R_p = \frac{e_0 - e_p}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 9})$$

Coeficiente de subsidência total (R_T):

$$R_T = \frac{e_0 - e_w}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 10})$$

Nas expressões acima contidas tem-se:

e_0 → Índice de vazios inicial;

e_w → Índice de vazios final;

e_p → Índice de vazios devido ao carregamento.

2.3.2.2 Critério de Reginatto & Ferrero (1973)

Reginatto & Ferrero (1973) *apud* Lollo (2008), com base no ensaio edométrico duplo, definiram um coeficiente de colapsibilidade C (Equação 11).

$$C = \frac{\sigma_{cs} - \sigma_0}{\sigma_{cn} - \sigma_0} \quad (\text{Equação 11})$$

Em que σ_{cs} é a tensão de pré-adensamento do solo saturado, σ_{cn} a tensão de pré-adensamento do solo com umidade de campo e σ_0 a tensão vertical geostática. As tensões estão ilustradas na Figura 2.12.

Esse coeficiente de colapsibilidade é analisado da seguinte maneira:

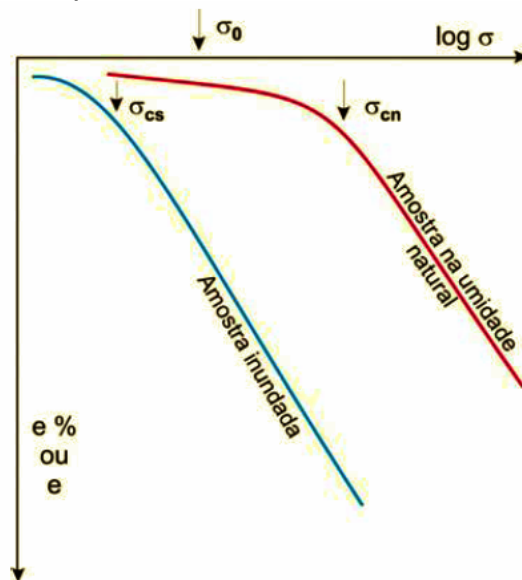
Se $C < 0$ – o solo é verdadeiramente colapsível;

Se $0 < C < 1$ – o solo é condicionalmente colapsível;

Se $C=1$ – o solo não é colapsível;

Se $C = -\infty$ – o solo é colapsível e normalmente adensado $\sigma_{cn} = \sigma_0$;

Figura 2.12 – Curva de compressão confinada do ensaio edométrico duplo.



Fonte: Reginatto e Ferrero (1973) *apud* Silva (2006, p.36)

Onde: e = índice de vazios, σ_{cs} = tensão de pré-adensamento do solo saturado, σ_{cn} = tensão de pré-adensamento do solo com umidade de campo, σ_0 = tensão vertical geostática.

2.3.2.3 Critério de Jennings & Knight (1975)

Jennings & Knight (1975) *apud* Gutierrez (2005) definiu o potencial de colapso (CP) com base em ensaios edométricos simples. Para o cálculo do CP, o ensaio é realizado normalmente até a tensão de 200 kPa. Com o término das deformações devido a este carregamento, o solo é inundado e após 24 horas é solicitado com carregamentos progressivos até o término do ensaio. A Figura 2.13 representa a curva típica resultante desse ensaio de onde são retirados os dados para o cálculo do potencial de colapso.

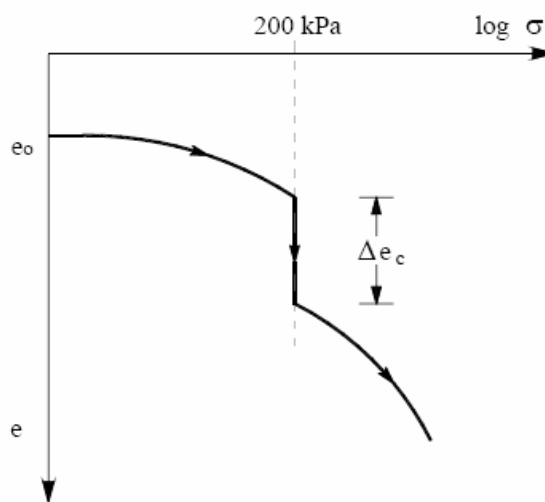
O potencial de colapso pode ser obtido mediante a Equação 12 ou por meio da Equação 13:

$$CP = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0} \quad \text{(Equação 12), ou}$$

$$CP = \frac{\Delta H_c}{H_0} \quad \text{(Equação 13)}$$

Sendo que Δe_c é a variação do índice de vazios pela inundação, e_0 o índice de vazios inicial, ΔH_c é a variação da altura do corpo de prova pela inundação e H_0 a altura inicial do corpo de prova.

Figura 2.13 – Curva do ensaio edométrico simples com inundação a 200 kPa.



Fonte: Jennings & Knight (1975) *apud* Lollo (2008, p.146).

A Tabela 2.2 correlaciona os potenciais de colapso (CP) com a gravidade do problema esperado na obra, ou seja, a gravidade do colapso esperado na obra.

Tabela 2.2 – Potencial de colapso segundo o critério de Jennings & Knight (1975).

CP	Gravidade do problema
0 - 1%	Nenhum
1 - 5%	Moderado
5 - 10%	Problemático
10 - 20%	Grave
> 20%	Muito grave

Fonte: Jennings & Knigth (1975) *apud* Lollo (2008, p.146).

2.3.2.4 Vargas (1978)

Vargas (1978) *apud* Lollo (2008) realizou a quantificação do colapso baseando-se na variação do índice de vazios considerando apenas o efeito da inundação no solo. Segundo seu critério, os solos seriam considerados colapsíveis se apresentassem $i > 0,02$. Onde i definido por meio da Equação 14:

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (\text{Equação 14})$$

Em que Δe é a variação do índice de vazios pela inundação e e_i o índice de vazios inicial antes da inundação.

2.3.2.5 Lutenegger & Saber (1988)

Lutenegger & Saber (1988) *apud* Gutierrez (2005), adotaram um critério semelhante ao de Jennings & Knight para a obtenção do potencial de colapso utilizando os resultados obtidos no ensaio edométrico simples, mas nesse caso a tensão de inundação do corpo de prova é de 300 kPa com água destilada. Um diferencial desse método é que o fluido de inundação e a carga em que isso ocorre podem ser determinados de acordo com a situação de estudo. O potencial de colapso é definido conforme apresentado na Equação 15 ou na Equação 16:

$$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (\text{Equação 15), ou}$$

$$I = \frac{\Delta H_i}{H_{ai}} \quad (\text{Equação 16})$$

Em que Δe é a variação do índice de vazios pela inundação, e_i o índice de vazios inicial, ΔH_i é a variação da altura do corpo de prova pela inundação e H_{ai} à altura inicial do corpo de prova. A Tabela 2.3 apresenta os potenciais de colapso (I) relacionado com a gravidade do problema.

Tabela 2.3 – Potencial de colapso segundo o critério de Lutenegger & Saber (1988).

Gravidade do problema	I%
Leve	2
Moderada	6
Alta	10

Fonte: Lutenegger & Saber (1988) *apud* Lollo (2008, p.147).

2.4 ELETROQUÍMICA DOS SOLOS

O estudo das propriedades eletroquímicas do solo é de fundamental importância para a compreensão dos fenômenos físico-químicos que ocorrem no solo (ALLEONI, 1992 *APUD* COLLARES, 2002). As cargas elétricas do solo são responsáveis pelo mecanismo de dispersão e floculação dos colóides e pelas trocas catiônicas e aniônicas, entre outros processos. A razão disto está na fração mineral do solo, principalmente na fração de argila e na fração orgânica (BENITES & MENDONÇA, 1998).

Os componentes do solo responsáveis pelas cargas elétricas podem ser divididos em dois grupos: cargas variáveis (óxidos, hidróxidos e matéria orgânica) e cargas permanentes (principalmente argilas silicatadas), segundo Mekaru & Uehara, (1972) *apud* Collares, (2002) e Benites & Mendonça, (1998). As cargas permanentes desenvolvem-se na superfície da partícula sólida do solo por substituições isomórficas estruturais devido a imperfeições internas, enquanto as variáveis, por meio de absorção de íons (cátions e ânions) na superfície dos colóides do solo (FONTES *et al.*, 2001).

Os solos da região de Londrina são originários do basalto que compõe o planalto sul do Brasil e são conhecidos como latossolos e nitossolos. Estes solos são altamente intemperizados, por isso a fração de argila possui

minerais silicatados de tipo 1:1 e óxidos, hidróxidos de Fe, Al, Mn. A caulinita é o principal mineral silicato e existe também a ocorrência de óxidos de ferro (hematita), e a gibsita e vermiculita, que são basicamente os únicos óxidos de Al em quantidades expressivas presentes nesse tipo de solo. O conjunto destes fatores resulta em um solo extremamente complexo e com presença de carga variável geralmente positiva (FONTES *ET. AL*, 2001; SMITH & EMERSON, 1976 *APUD* COLLARES, 2002).

2.4.1 Dupla Camada Elétrica

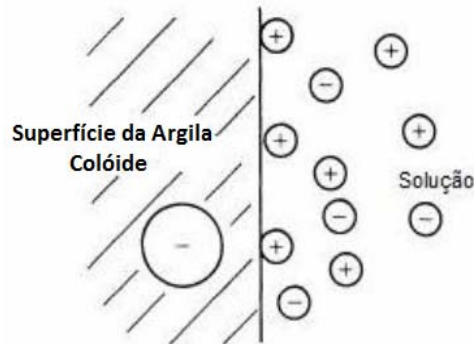
As trocas realizadas na superfície dos coloides do solo ocorrem porque este material está carregado eletricamente. O déficit ou excesso de elétrons no solo se dá pelas substituições isomórficas, as imperfeições nas superfícies e a estrutura interna dos argilominerais, e as valências insatisfeitas nas superfícies coloidais. (FONTES *et al.*, 2001; COLLARES, 2002).

As reações que ocorrem entre as partículas de solo e o fluido de inundação ocorrem devido à instabilidade coloidal que ocorre devido às seguintes variáveis: concentração eletrolítica, valência do íon, constante dielétrica, temperatura, tamanho do íon hidratado, pH e adsorção do ânion (COLLARES, 2002).

De acordo com Yong *et al.* (1992) a dupla camada elétrica é a carga elétrica composta na interface da fração de argila. Isso só ocorre quando existe uma interação entre a superfície do solo carregada negativamente, com os fluidos carregados positivamente.

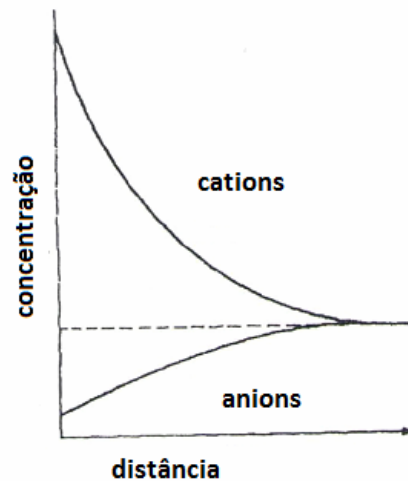
A fração de argila é principalmente carregada negativamente que é balanceada por trocas de cátions. Quanto à argila se encontra seca as partículas catiônicas se agrupam na superfície da argila para neutralizá-la. Assim que ocorre o contato com a água (ou outro fluido) os cátions aglomeram-se em volta do coloide (Figura 2.14). A Figura 2.15 apresenta a distribuição de íons com a distância da superfície da partícula de argila e a Figura 2.16 apresenta a curva do potencial elétrico com a distância. Esta teoria é frequentemente denominada a teoria de Gouy-Chapman (1913) *apud* Collares, (2002).

Figura 2.14 – Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, cátions aglomerados em volta do colóide.



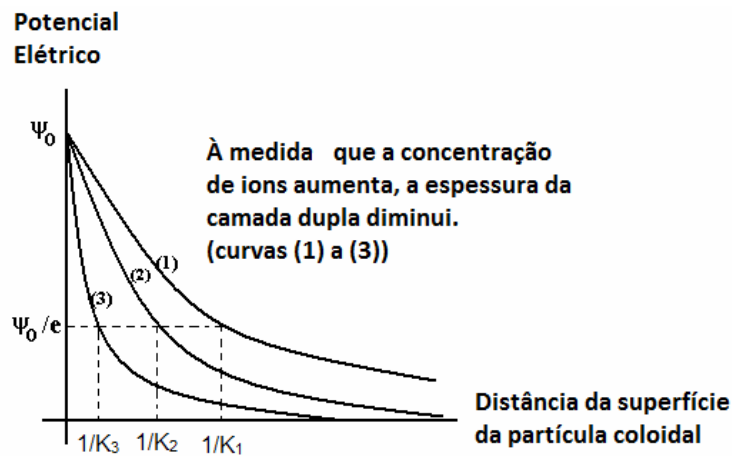
Fonte: Neckel (2009, p.27) modificado pelo próprio autor.

Figura 2.15 – Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, distribuição de íons com a distância da superfície da partícula de argila



Fonte: Collares (2002, p.74) modificado pelo próprio autor.

Figura 2.16 – Dupla Camada Difusa de Gouy – Chapman, curva do potencial elétrico com a distância

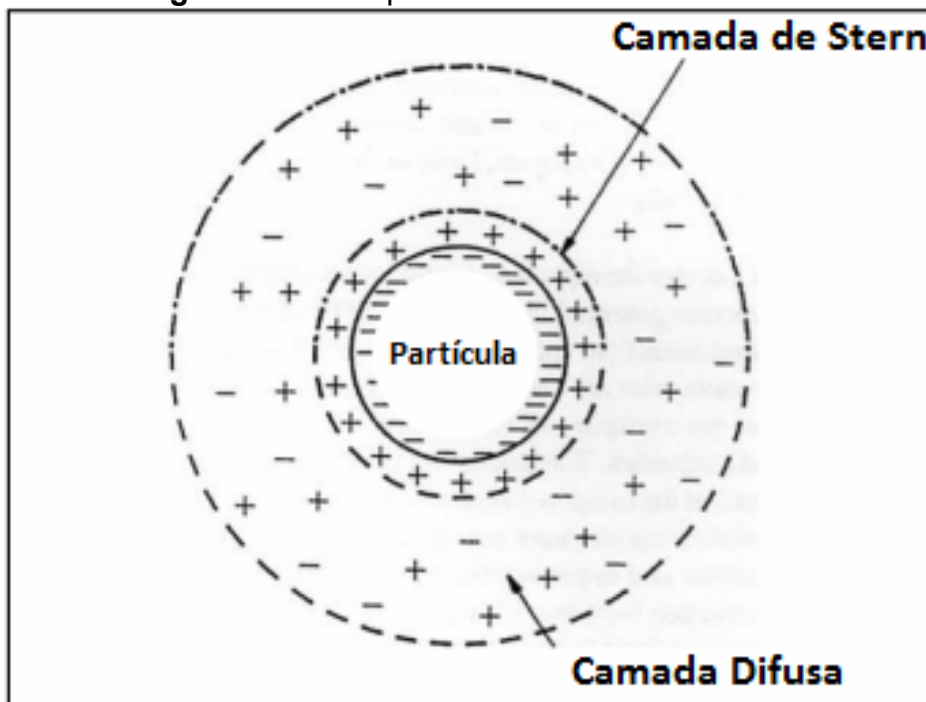


Fonte: Colloids - Community (1999) modificado pelo próprio autor.

Porém essa teoria não é adequada para altas concentrações salinas ou alto potenciais de superfície. Stern (1924) aperfeiçoou o método introduzido correções na dupla camada. Segundo o autor os íons não conseguem se aproximar totalmente da superfície. Sendo assim o autor desenvolveu uma teoria que assume que existem duas camadas: uma bem próxima à superfície (camada de Stern) que é formada pelos íons adsorvidos, e outra camada denominada camada difusa representada pelos outros íons. Na camada de Stern está localizada a superfície do coloide. A Figura 2.17 representa o modelo de Stern da dupla camada.

A teoria da dupla camada aperfeiçoada por Stern tende a explicar os fenômenos físico-químicos coloidais em superfícies eletricamente carregadas, tanto qualitativamente com quantitativamente. Os princípios dessa teoria são cabíveis de serem aplicados no sistema argila – fluido de inundação, pois auxiliam na compreensão do comportamento do solo. Alguns fenômenos podem ser tratados pela teoria da Dupla Camada Elétrica, tais como, a compressibilidade e a expansibilidade, a susceptibilidade à erosão, a dispersabilidade, entre outros inúmeros fenômenos (CASANOVA, 1989).

Figura 2.17 – Dupla Camada Modelo de Stern



Fonte: Kim (1995) *apud* Bragança (2008, p. 5).

2.5 ESTUDOS EM SOLOS COLAPSÍVEIS

Em solos potencialmente colapsíveis, suas partículas são mantidas em uma posição estruturalmente estável pela presença de vínculos capazes de conferir ao solo uma resistência adicional. Esse estado de equilíbrio permanece enquanto nenhum agente externo intervir na estrutura metaestável. Esta interferência pode causar uma redução na resistência adicional e temporária adquirida pelo solo.

As fontes mais comuns de contaminação de solo são provenientes de vazamentos que ocorrem em reservatórios de combustíveis, tubulações de esgoto doméstico e industrial. Além do potencial de contaminação, a presença dessas substâncias pode influenciar no comportamento tensão versus deformação do solo, em função da interação solo-líquido. Esta situação pode ser agravada se o solo possuir estrutura colapsível.

Camapum (1987) realizou um estudo em amostras de argila porosa das cidades de Guará e Ceilândia (DF), estas foram inundadas em três fluidos distintos: água de chuva (pH 7,0), água de abastecimento da rede de distribuição local (pH 8,9) e a mesma água da rede de abastecimento com um pH corrigido para 4,0 (com adição de H_2S). Neste estudo foi observado que as amostras de solo da cidade de Guará não apresentaram comportamentos distintos quando inundadas em diversos fluidos. Porém, o solo da cidade de Ceilândia apresentou o seguinte comportamento: quando o valor do pH aumenta, o potencial de colapso tendem a aumentar.

Mariz & Casanova (1994) realizaram ensaios edométricos no solo de Brasília e utilizaram como fluidos de inundação a água, dimetil sulfóxido e ciclohexano. Estes fluidos foram escolhidos devido a diversidades físico-químicas que eles possuem. Os autores constataram que o potencial de colapso foi maior nos fluidos que apresentaram maior constante dielétrica e tensão superficial.

Para se avaliar a influência dos diferentes fluidos de umedecimento no efeito do colapso do solo, Rodrigues (2003) preparou em laboratório diversas soluções que foram utilizadas para a realização do ensaio edométrico. Estas soluções são encontradas tipicamente na composição dos esgotos sanitários. De acordo com o autor e baseado nos resultados encontrados por ele, soluções que apresentaram o maior potencial de colapso e deformação específica foram a do

esgoto doméstico, da água sanitária e do sabão em pó. O autor explica esse fato devido à presença de sódio nessas soluções, pois ele age como um defloculante no solo quebrando os agregados formados de partículas de granulometria mais fina. Além disso, existe a influência do pH, da viscosidade e da tensão superficial de cada solução.

Por outro lado, Collares (2002) observou que: (i) a constante de dielétrica dos fluidos de inundação é mais eficiente para a avaliação do colapso dos solos estudados; (ii) existe uma relação entre o aumento da constante de dielétrica e o aumento do potencial de colapso; (iii) onde ocorreram os maiores índices de colapso ocorreu uma maior diminuição dos macroporos; (iv) em fluidos a base de água e soluções orgânicas ocorre um colapso brusco e uma estabilização em poucos minutos, porém em soluções preparadas quimicamente apresentam deformações crescentes com o tempo, isso acaba por indicar que as mesmas podem estar interagindo com o solo.

Faria *et al.* (2003) realizaram um estudo no solo do Campo Experimental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília com amostras coletadas a 5 metros de profundidade. O intuito dos autores era avaliar a contribuição do oxi-hidróxido de Fe matricial no comportamento mecânico em solos tropicais. Para analisar este fenômeno foram realizadas extrações químicas desse elemento em amostras indeformadas e deformadas, essa extração foi realizada em laboratório para simular ações de contaminantes conhecidos, tais como o chorume.

Para analisar o fenômeno do colapso do solo foram realizados ensaios edométricos nas amostras submetidas à extração química e também em amostras no estado natural. Os autores obtiveram o resultado de que em condições de pH elevado o chorume pode agir como um agente desagregante, promovendo a dissolução dos oxi-hidróxidos de Fe. Também puderam concluir que o oxi-hidróxidos de Fe aumentam a carga elétrica negativa e conseqüentemente a resistência do solo, por se tratarem de partículas extremamente finas que ficam sobre a superfície dos minerais.

O comportamento dos solos colapsíveis quando inundados com fluidos diferentes foram analisados por Garcia *et al.* (2004), Rodrigues & Lollo (2007) e Rodrigues *et al.* (2010) em um solo tropical arenoso laterítico do município de Ilha Solteira (SP). Para analisar o colapso do solo os autores estudaram as características químicas do fluido de inundação (água destilada, esgoto doméstico,

solução de detergente líquido, óleo, solução de sabão em pó) e as deformações axiais de amostras de solos coletadas a 1 metro de profundidade. As deformações axiais foram analisadas a partir de ensaios edométricos duplos e simples.

Os resultados obtidos pelos autores mostram que a magnitude do colapso está inteiramente influenciada pela composição química do fluido de inundação. Foram concluídos também que para o solo estudado o esgoto doméstico, a solução de sabão em pó e a solução a base de água sanitária obtiveram deformações maiores que às da água destilada, o óleo e a solução a base de detergente líquido. Os fluidos estudados possuem diferentes composições químicas, porém os autores chegaram à conclusão de que os que apresentam sódio em sua composição provocaram os maiores colapsos. Contudo é possível também concluir que o mecanismo do colapso está correlacionado à eliminação da sucção matricial e ao enfraquecimento dos compostos cimentantes do solo.

Gutierrez (2005) avaliou o comportamento colapsível do solo sob o aspecto de sua estrutura natural, de três perfis típicos da Região Norte do Paraná. O Perfil I fica localizado na Vila Esperança (Campus da Universidade Estadual de Maringá -UEM) sendo este solo classificado como um Latossolo Vermelho (textura argilosa). O Perfil II fica localizado no Jardim Universo sendo este solo classificado como um Nitossolo Vermelho. O perfil III fica no Distrito de Iguatemi (Fazenda Experimental de Iguatemi da UEM) sendo este solo classificado como um Latossolo Vermelho (textura média). As amostras deformadas e indeformadas foram coletadas em diversas profundidades até atingir o solo de alteração.

A avaliação do colapso do solo foi realizada a partir de ensaios edométricos simples e duplos, o fluido de inundação utilizado foi à água. O comportamento da estrutura do solo foi observado antes e após os ensaios edométricos simples e duplos, através do acompanhamento da macro e microestrutura do solo a partir de análises micromorfológicas. Os ensaios edométricos duplos foram carregados até a tensão de 800 kPa e 1600 kPa. Os ensaios edométricos simples foram carregados na umidade natural até as tensões de interesse (12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa; 800 kPa e 1600 kPa).

Os resultados obtidos pela autora indicam que para todos os perfis de Latossolo ocorreram o colapso, porém para o perfil II (Nitossolo) as deformações ocorridas durante os ensaios edométricos não o classificam como um solo com

comportamento colapsável. As análises realizadas salientam que a tensão de pré-adensamento virtual, os fatores pedológicos influenciam na magnitude do colapso. Também foi possível analisar que os maiores valores nos índices de colapso estão associados a uma maior ocorrência de plasma microagregado com porosidade intermicroagregado fortemente comunicante, índice de porosidade alto e ocorrência de macroporos, esta conclusão corrobora para a forte relação entre o fenômeno do colapso do solo e a estrutura do solo.

Nos estudos realizados no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina por LOPES (2001), TEIXEIRA (2004) e TEIXEIRA *et al.* (2008) através de experimentos em laboratório, ensaios edométricos, para os estudos de colapsibilidade do solo usando água como fluido de saturação foi constatado que o solo de Londrina é colapsável, para determinados níveis de carga, até 7 m de profundidade.

Contudo MANSO (2011) observou em seu estudo sobre o colapso do solo na Central de Tratamento de Resíduos de Londrina/PR. (CTR), que quando inundado com água o solo apresenta colapso, porém quando este mesmo solo é inundado com lixiviado o solo não apresenta colapso. Os ensaios edométricos simples foram carregados na umidade natural até as tensões propostas de 80 kPa e 637 kPa (cargas de interesse), e os ensaios edométricos duplos foram carregados até a tensão de 637 kPa. A conclusão do trabalho da autora é de que esse fenômeno deve ter uma investigação mais detalhada no solo da região de Londrina, já que, os dados obtidos na inundação com lixiviado diferem dos resultados normalmente obtidos em solos colapsáveis, tais como, os dados obtidos por Faria *et al.* (2003). Manso (2011) também salienta a importância do estudo da interação físico-química entre o solo e o fluido de inundação e sua influência no fenômeno do colapso do solo.

Rodrigues e Vilar (2012) compararam a influência do estado de tensões na magnitude do colapso do solo. Este comparativo foi realizado através de ensaios edométricos e ensaios de compressão triaxial em amostras de solo arenoso da cidade de Pereira Barreto (SP). Os autores observaram que em ambos os procedimentos experimentais foram encontradas deformações por colapso. Ainda salientam uma possível interferência das tensões confinantes e das deformações laterais, já que os potenciais de colapso são menores nos ensaios de compressão triaxial em relação aos ensaios edométricos até uma tensão de 200 kPa.

As interações físico-químicas entre o fluido de inundação e o solo, seu arranjo estrutural e seu grau de estabilidade estão intrinsecamente relacionados ao fenômeno do colapso do solo, segundo Motta & Ferreira (2011). Esta afirmação foi feita pelos autores após estudos realizados em amostras de solo (areia amarelo – avermelhada) coletadas do município de Petrolândia-PE. As análises foram realizadas por meio de ensaios edométricos simples e duplos com inundação em diversos fluidos (esgoto bruto; soluções preparadas à base de água sanitária, de detergente, de sabão em pó; óleo de soja; chorume e água destilada).

As propriedades físico-químicas dos fluidos de inundação apresentam influência no colapso do solo. O pH dos fluidos de inundação mostram uma tendência a aumentar o potencial de colapso quando mais alcalinos. A condutividade elétrica também apresenta certa influência sobre o fenômeno do colapso, quanto maior a condutividade elétrica do fluido inundante o solo apresentou maiores potenciais de colapso. Também foram analisados a influência das tensões superficiais dos líquidos de inundação, durante os ensaios edométricos, e pode se observar que quanto menores as tensões superficiais dos líquidos mais tempo se levou para estabilizar as deformações. Porém os autores ressaltam que o potencial de colapso está correlacionado ao um conjunto de fatores, tais como, molhabilidade, pH e condutividade elétrica.

Segundo Bandeira *et al.* (2012) os solos do município de Juazeiro do Norte (CE) apresentam características de solos potencialmente colapsíveis. Para confirmar essa suposição e discutir o potencial de colapso os autores realizaram análises qualitativas (por critérios baseados nos índices físicos) e quantitativas (por critérios baseados nos ensaios edométricos simples e duplo). As análises realizadas por critérios qualitativos identificam o solo da região como potencialmente colapsível, mas não fornecem a magnitude do colapso, exceto as propostas por Denisov (1951) e Prikloonskij (1952). Entretanto, as análises realizadas baseadas em critérios quantitativos classifica o solo como colapsível pelo critério de Vargas (1978).

Em Primavera do Leste/MT foram encontrados solos predominantemente arenosos e colapsíveis. Conciani & Barbosa (2013) realizaram um estudo de casos em uma indústria localizada nesta cidade. Nesta indústria ocorre o esmagamento de grãos para a produção de óleo, nesse local existe uma caldeira que produz vapor (que fica implantada na parte posterior da fábrica). O

estudo de caso foi realizado na caldeira que está assentada sobre dois blocos de fundação que transmitem as cargas através de estacas escavadas.

Os autores relatam que em janeiro 2010 os engenheiros da indústria observaram que o piso da caldeira havia cedido, para solucionar o problema foram feitos reparos no local. Porém em junho do mesmo ano foram observados problemas na estrutura da torre da caldeira, esta estava fora de prumo na ordem de 15 cm na vertical. Foi observado primeiramente um recalque na ordem de 40 cm que a equipe de engenharia do local acreditava ter sido uniforme. Em junho de 2010 foram verificados que os recalques foram diferenciais e elevados, as medições indicam que o recalque diferencial dos dois blocos (com 5,4 m de distância eixo a eixo dos blocos) foi de 14 cm aproximadamente.

Conciani & Barbosa (2013) observaram durante uma visita de campo que as canaletas que escoam a água estavam trincadas ou com pontos de vazamento. Durante as inspeções feitas pelos autores foi possível observar que existia água acumulada sob o piso e no solo. A água encontrada era oriunda de um vazamento na área da caldeira, poluída com cinzas e com temperatura na ordem de 50°C. A partir de ensaios edométricos em amostras coletadas na área da caldeira na profundidade de 1 m constatam que o solo analisado é colapsível. A água infiltrada no solo tem um característica alcalina (pH=9), sendo assim ocorrem duas características importantes quando ocorre a infiltração nas fundações – o umedecimento do solo colapsível e as interações físico-químicas entre solo e fluido de inundação. Os autores concluem que a água ao infiltrar gerou o colapso da estrutura da torre da caldeira, como o fluido de inundação é alcalino ocorreu um aumento na velocidade dos recalques e uma lixiviação dos finos. Os autores ainda afirmam que a infiltração da água afetou o solo até uma profundidade de 15 m.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO

Os solos da região de Londrina, assim como grande parte da região sul-sudeste e centro-oeste do país, são originários do basalto que compõe o planalto sul do Brasil e são conhecidos como latossolos e nitossolos, antes denominados de “Terra Roxa” segundo Barros *et al.* (2008). A EMBRAPA em 2013 publicou uma nova classificação dos solos, e a partir disto os solos brasileiros teve suas denominações alteradas. O solo conhecido popularmente como “Terra Roxa” vai receber várias designações. Em Londrina a partir da nova classificação os solos serão referenciados como: Latossolos, Nitossolos e Neossolos Litólicos (EMBRAPA FLORESTAS *et al.*, 2012).

De acordo com levantamento da EMBRAPA (1984), a principal ocorrência no estado do Paraná é de latossolos, com cobertura de cerca de 31% da área total do estado (BHERING & SANTOS, 2008).

O Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) “Saburo Morimoto” da Universidade Estadual de Londrina foi criado em 1998 motivado pela busca de conhecimento científico dos solos de Londrina, visando compreender o comportamento específico e promover suporte técnico para fundações de novas obras de edifícios. Desde então, diversas pesquisas foram realizadas no local sobre: estaca hélice contínua (BRANCO *et al.*, 2000); estaca broca manual (PEDROSO e TEIXEIRA, 2000; GONÇALVES *et al.*, 2003; MIGUEL e BELINCANTA, 2004); estaca escavada com trado mecânico (VESSARO *et al.*, 2004); estacas apiloadas (ALMEIDA, 2004); além de estudos de colapsibilidade usando água como fluido de saturação (TEIXEIRA *et al.*, 2004); compactação (TEIXEIRA *et al.*, 2003); caracterização física e química (TEIXEIRA & PINESE, 2006); caracterização geológico-geotécnica (TEIXEIRA *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2008), curva característica (MIGUEL *et al.*, 2005) e permeabilidade *in situ* (TEIXEIRA & PINESE, 2006).

O solo usado neste estudo pertence à área localizada no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), na cidade de Londrina/PR. Esta área destinada ao CEEG abrange cerca de 2.900m² e fica situada dentro do Campus Universitário da UEL, em local adjacente ao Laboratório de Geotécnica (Figura 3.1). O perfil típico deste subsolo foi obtido através de sondagens do tipo SPT – Standart Penetration Test, Figura 3.2.

Figura 3.1 – Visão Geral do CEEG.



Fonte: Komori (2012, p.27).

Figura 3.2 – Perfil de solo característico do CEEG/UEL.



Fonte: Teixeira *et al.* (2004, p. 496).

As pesquisas geotécnicas de campo e laboratório realizadas em amostras do CEEG demonstraram que os solos, até cerca de 12 metros de profundidade, são formados por argila porosa laterítica. A grande espessura da camada laterítica está dentro da ordem de grandeza apontada por Vargas (1951) para o perfil típico do planalto sul do país: horizonte eluvial conhecido por argila vermelha porosa com de espessura de 10 a 15 metros.

A laterização é um processo acentuado de intemperismo que ocorre frequentemente em regiões tropicais, de alta temperatura e chuvas abundantes, e é caracterizado pela rápida quebra de feldspatos e minerais ferromagnesianos, remoção de sílica e bases e concentração de óxidos de ferro e alumínio (BARATA, 1981; MITCHELL & SITAR, 1982; BIGARELLA *et al.*, 1996).

Os solos sujeitos à laterização têm características comuns como alta porosidade, baixo percentual de silte, formação de grumos e outras, que conduzem esses solos a comportamentos específicos, como avaliado na classificação MCT proposta por Nogami & Villibor (1981).

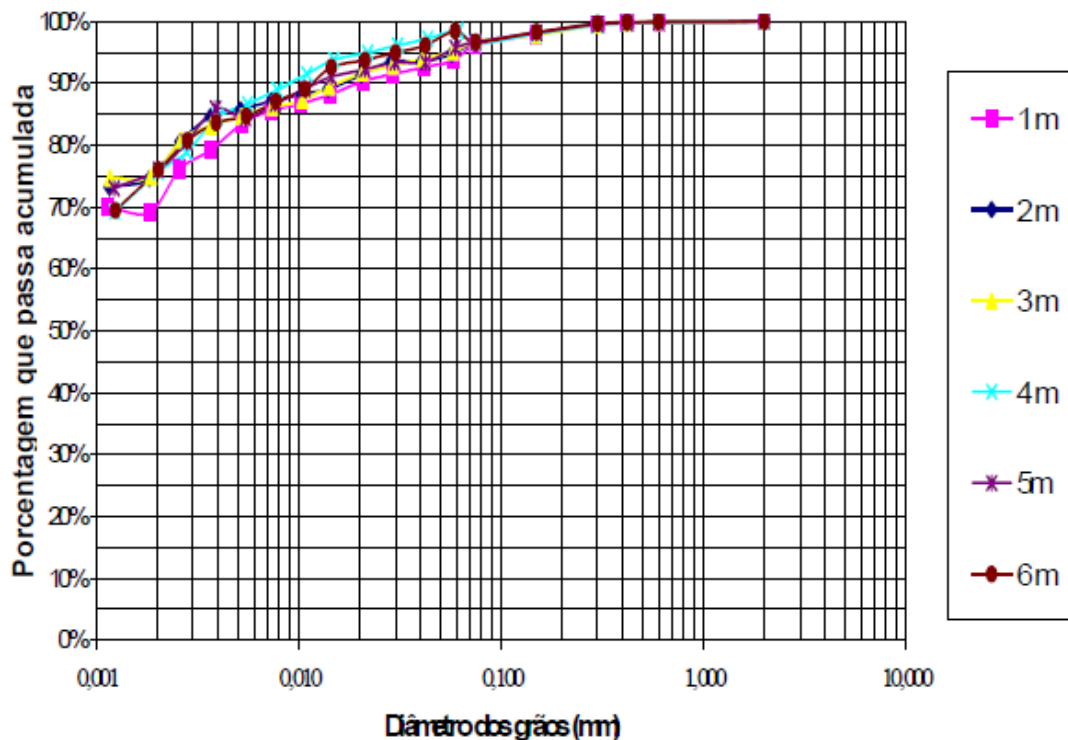
Das investigações realizadas no CEEG pode-se dizer que a argila porosa laterítica apresenta índice de vazios próximo a 2 (índice de vazios referente a camada superficial do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica, com profundidade de até 3-4 metros) ; massa específica dos sólidos próxima a 3; visível

agregação; granulometria com defloculante de argila siltosa; granulometria sem defloculante de silte arenoso; permeabilidade 10^{-3} a 10^{-5} cm/s e potencial colapsível (BRANCO *et al.*, 1998; LOPES, 2002; MIGUEL *et al.*, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2004; TEIXEIRA *et al.*, 2006 e TEIXEIRA *et al.*, 2008).

Os solos superficiais (até 2 metros), do campus Universitário da UEL, foram caracterizados por Rocha *et al.* (1991) como latossolo vermelho com mineralogia da fração argila compreendida por caulinita, gibsita e vermiculita, além de óxidos de ferro (hematita). A presença marcante de argilominerais também é apontada para o solo de Londrina no trabalho de Vargas (1951).

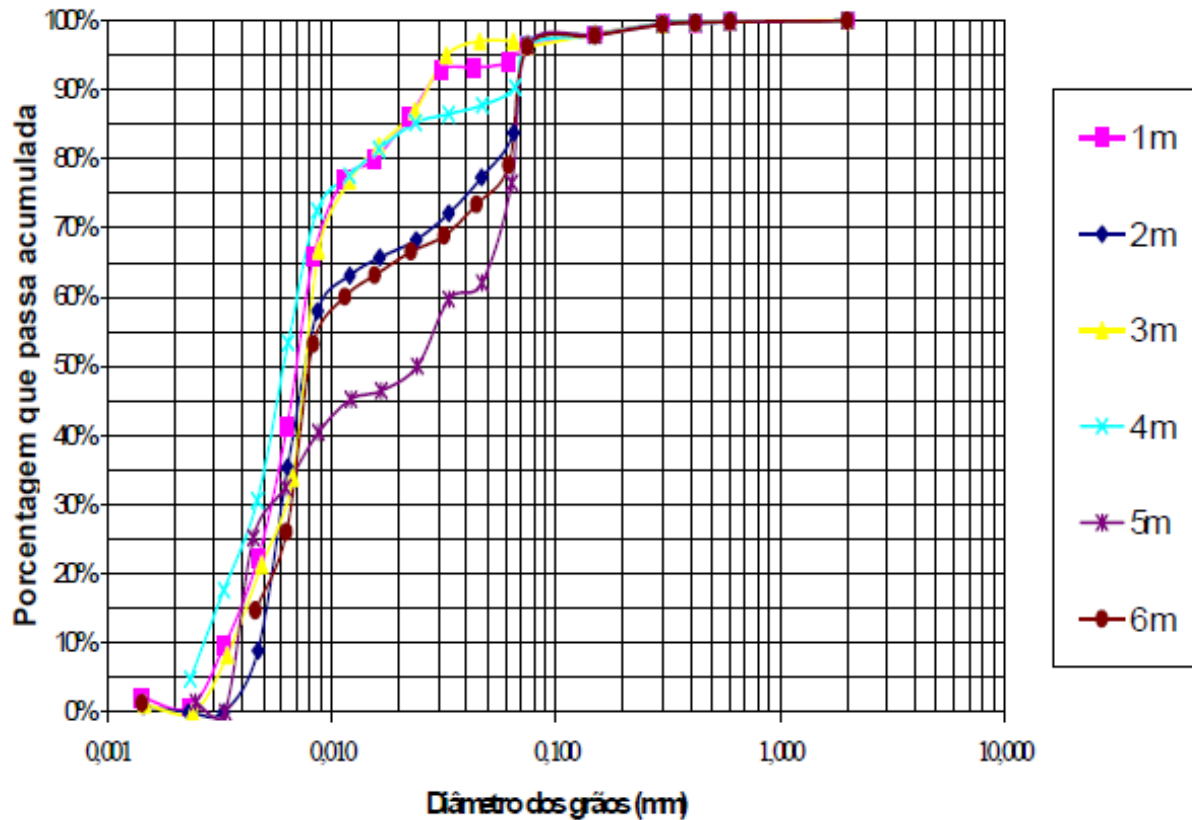
As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam as curvas granulométricas obtidas nos resultados de ensaios realizados em laboratório por Teixeira *et al.* (2004). Estas figuras mostram que existem diferenças significativas na forma das curvas, obtidas com o uso de defloculante e sem o uso de defloculante. O solo pode ser classificado como uma argila siltosa quando ocorre o uso de defloculante e quando o mesmo é submetido a um ensaio sem defloculante pode ser classificado como um silte arenoso. Este fenômeno confirma que o solo da região de Londrina apresenta microagregação de argila.

Figura 3.3 – Curvas Granulométricas, obtidas com uso de defloculante do CEEG/UEL.



Fonte: Teixeira *et al.* (2004, p. 497).

Figura 3.4 – Curvas Granulométricas, obtidas sem uso de defloculante do CEEG/UEL.



Ainda, de estudos realizados no CEEG/UEL foram obtidas as curvas características de sucção da camada de solo poroso da região de Londrina para as profundidades de 4 metros e 6 metros que são apresentadas na Figura 3.5. Esta curva é representada pelo teor de umidade gravimétrico *versus* sucção matricial. A Tabela 3.1 apresenta os valores de índices físicos das amostras ensaiadas (MIGUEL *et al.*, 2005).

Tabela 3.1 – Valores índices físicos das amostras ensaiadas do CEEG/UEL.

Índices Físicos	Amostra 4 metros				Amostra 6 metros			
	Nº. 1	Nº. 2	Nº. 3	Nº. 4	Nº. 1	Nº. 2	Nº. 3	Nº. 4
Índice de vazios inicial	1,90	1,93	2,00	1,90	2,11	1,89	1,76	1,81
Peso específico natural (kN/m ³)	15,82	15,70	15,31	15,94	14,80	15,91	16,54	16,31
Teor de umidade inicial (%)	51,95	52,39	52,17	52,90	50,38	50,11	49,31	49,76
Peso específico dos sólidos (kN/m ³)	30,20				30,60			

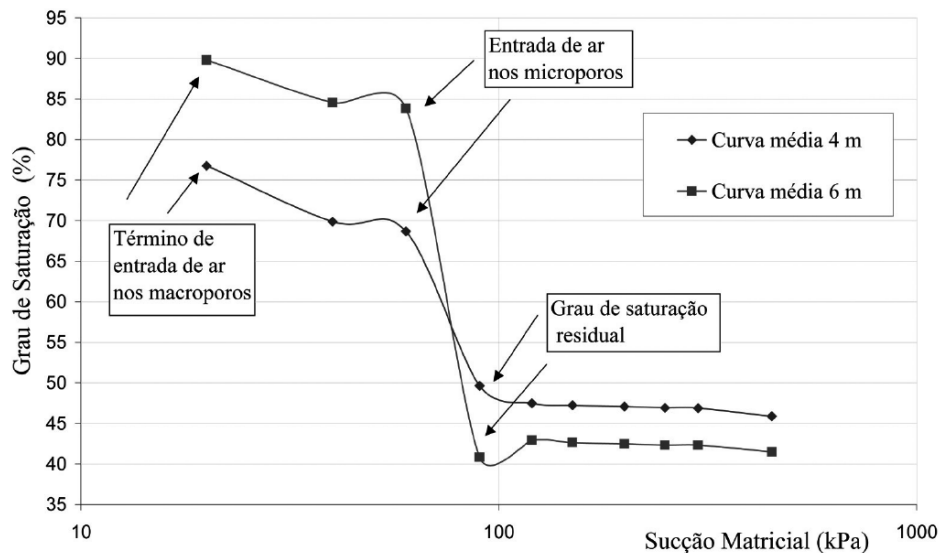
Fonte: Miguel *et al.* (2005, p. 72).

Nesta Tabela os valores de teores de umidade são elevados, uma vez que as amostras foram submetidas à elevação da umidade e com isso o grau de saturação, na tentativa de saturação, pois a curva de sucção foi obtida através do procedimento de secagem.

O ensaio para a obtenção da curva característica foi realizado no equipamento Aparelho de Richards, composto principalmente por em uma câmara contendo em seu interior uma pedra porosa de alta pressão de entrada de ar.

O ensaio consiste na colocação do corpo de prova em contato direto com a pedra porosa de alta pressão de entrada de ar saturada, sendo as amostras submetidas a sucessivas pressões de ar, assumidas como o valor de sucção matricial gradualmente maiores, configurando um procedimento de secagem. As amostras tendem a perder água até que um equilíbrio se estabeleça, verificado por meio de pesagem dessas amostras. Na condição final de equilíbrio, a pressão de ar aplicada é igual à sucção do solo.

Figura 3.5 – Curvas Características de sucção para profundidade de 4 metros e 6 metros do CEEG/UEL.



Fonte: Miguel *et al.* (2005, p. 72).

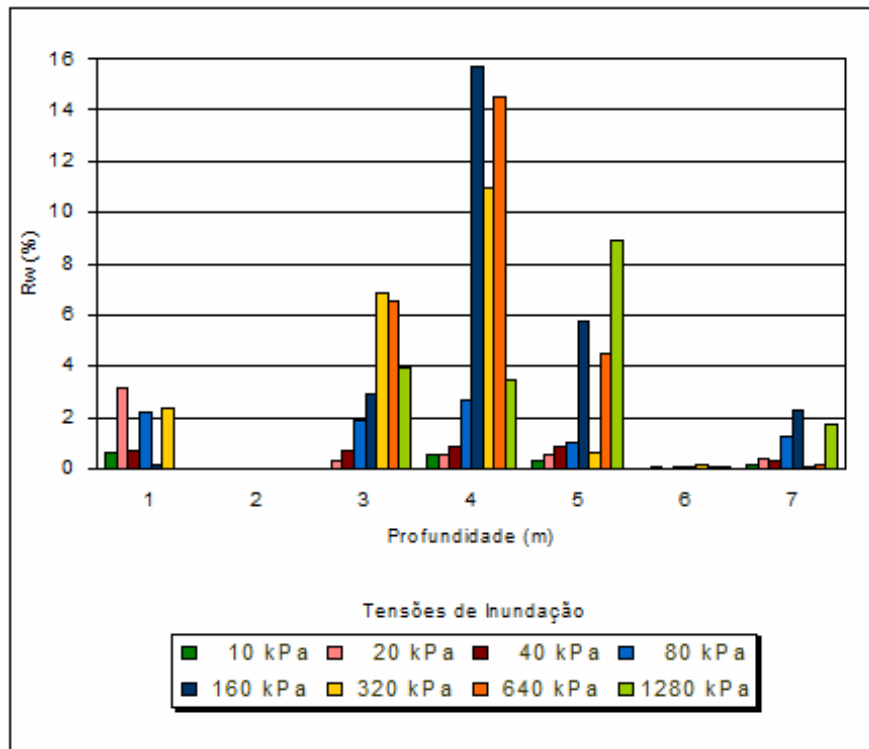
Segundo Miguel *et al.* (2005) as curvas apresentadas na Figura 3.5 são típicas de solos nos quais a distribuição dos poros é mal graduada ou de granulação aberta, ou seja, bimodal. Isto significa que o solo apresenta macroporos e microporos. O colapso do solo ocorre nos macroporos.

O trecho da curva, definido pelos pontos de entrada de ar nos microporos e o grau de saturação residual do solo, torna-se linear com inclinação dependente da graduação dos microporos e da própria natureza química-mineralógica do solo (CARVALHO & LEROUEIL, 2004).

Percebe-se que as duas curvas têm a tendência de um traçado semelhante, embora para sucções menores que 90 kPa (grau de saturação residual) a curva referente à profundidade de 4 m apresentou valores de teor de umidade menores que a curva referente à profundidade de 6 m. Para sucções maiores que 90 kPa, a curva referente à 4 m de profundidade apresenta valores de teor de umidade maiores que os da curva referente à 6 m, embora essa diferença seja menor e praticamente constante com o aumento da sucção. Esta diferença de traçado das curvas evidencia a mudança de estrutura do solo ao longo da profundidade.

Da Figura 3.6 Teixeira *et al* (2004) pode-se observar que a tendência do índice de subsidência (R_w) é de ser crescente ao longo da profundidade, até aproximadamente a profundidade de 4m. Este índice representa potencial de colapso do solo estudado. A partir de 4 m de profundidade os valores de R_w foram reduzindo-se novamente. Isto pode ser proveniente da influência das características da estrutura do solo ao longo da profundidade e também do índice de vazios inicial das amostras de solo trazidas do campo.

Figura 3.6 – Variação do Índice de Subsidiência do CEEG/UEL.



Fonte: Teixeira *et al.* (2004, p. 498).

Teixeira *et al.* (2004) concluíram que os resultados dos ensaios realizados com corpos de prova provenientes da profundidade de 2m apontam no sentido da grande influência do teor de umidade inicial no comportamento colapsível do solo. Pois para os corpos de prova inundados no estágio de tensão final de 1280kPa, verificou-se que quando estes foram secos resultaram na queda de nove pontos percentuais no teor de umidade, o índice de subsidiência passou a ser de aproximadamente 23%, contra um índice de subsidiência de 0,6% dos corpos de prova inundados no mesmo estágio de pressão, mas ensaiados na umidade de moldagem de 35%.

De acordo com Lopes (2002), Teixeira *et al.* (2004) e Teixeira *et al.* (2008) o solo do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina é colapsível, segundo critério de Vargas (1978), até 7 m de profundidade. Estas características puderam ser constatadas a partir de ensaios edométricos simples e duplos com inundação em água.

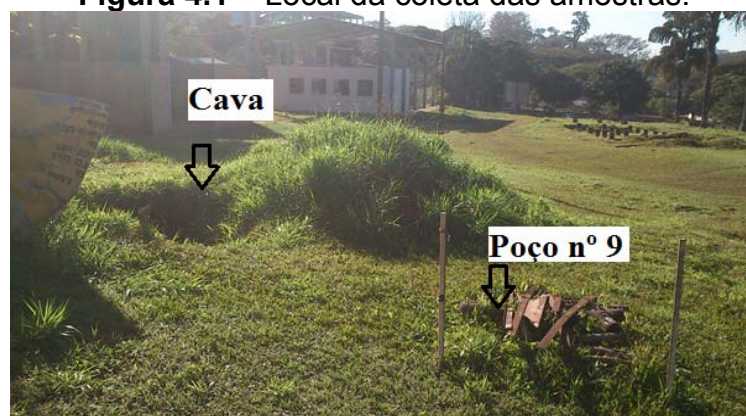
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO EM ESTUDO

Para o desenvolvimento da pesquisa foram coletadas amostras de solo do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG). A área destinada ao CEEG abrange cerca de 2.900m² e situado dentro do Campus Universitário da UEL, em local adjacente ao Laboratório de Geotécnica. Para execução dos ensaios de laboratório foram utilizadas amostras indeformadas e deformadas do solo coletadas na cava ao lado do poço n.º 9 (Figura 4.1).

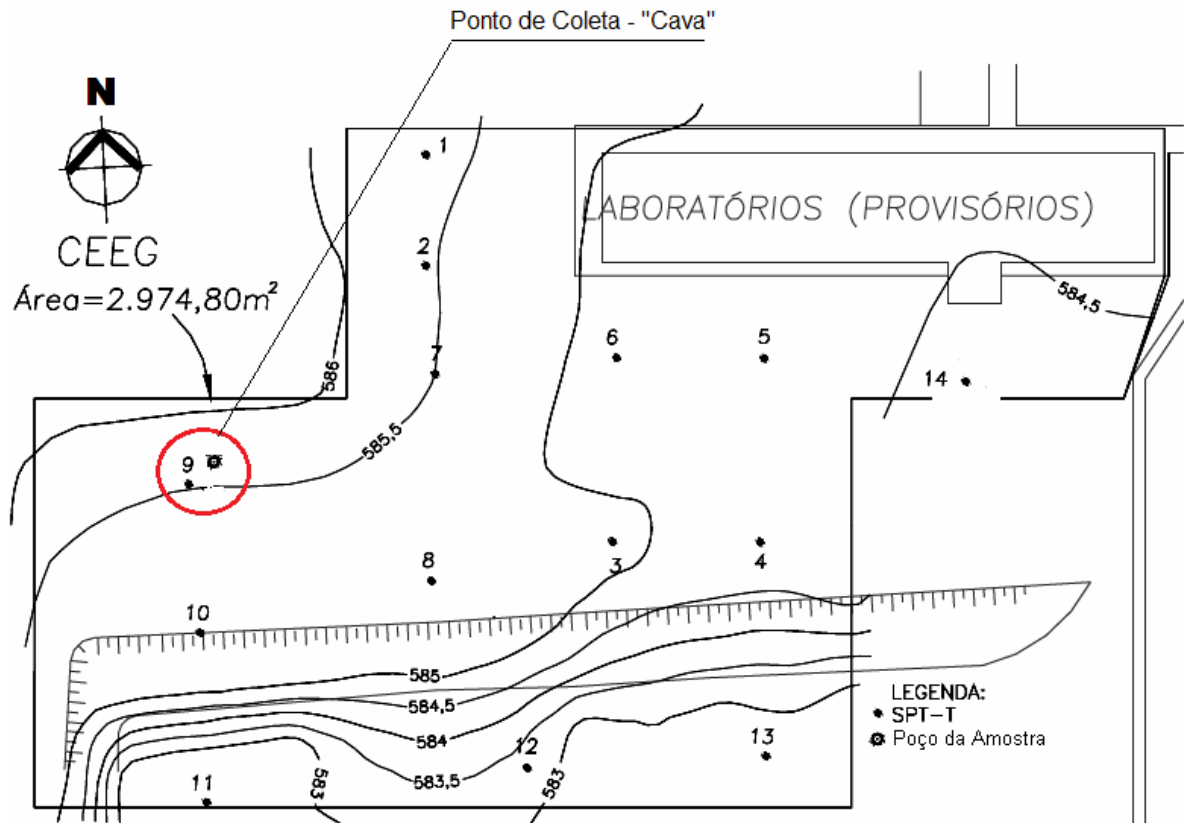
O solo típico da cidade de Londrina apresenta o comportamento particular dos solos residuais tropicais que sofreram intensa laterização. Christoni & Teixeira (2014) analisaram as características físicas, químicas e mineralógicas do solo do poço n.º 9 (Figura 4.2), do CEEG, como o objetivo compreender a variação das características físicas e mineralógicas, do perfil de solo ao longo da profundidade. Foi executada uma sondagem de simples reconhecimento de solo do tipo SPT (Standard Penetration Test) (Figura 4.3). A partir deste ensaio de campo foi possível obter os tipos de solo e suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água e por fim, determinar os índices de resistência à penetração (N) a cada metro. Também foram coletadas amostras deformadas para avaliar as características físicas, químicas e mineralógicas do solo, ao longo do perfil estudado. A descrição visual-tátil do solo definiu o primeiro estrato composto por uma argila siltosa mole a rija, solo evoluído de cor marrom avermelhada (0 a 13m). Perfil completo do solo do poço n.º 9 do CEEG definido a partir da sondagem do tipo SPT está no Anexo A.

Figura 4.1 – Local da coleta das amostras.



Fonte: Komori (2012, p.28).

Figura 4.2 – Croqui do CEEG com a localização do poço n.º 9 e ponto de coleta.



Fonte: Christoni & Teixeira (2014, p.9), modificado pelo autor.

Christoni & Teixeira (2014) realizaram ensaios de: teor de umidade e massa específica dos sólidos (γ_s) segundo a NBR 6508 (1984); granulometria conjunta segundo a NBR 7181 (1984) e limites de Atterberg segundo a NBR 6457 (1986), a fim de se determinar os limites de liquidez e plasticidade do solo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1. Observa-se que o solo pode ser classificado segundo sua granulometria como sendo argila siltosa, de acordo com a NBR 6502/95. A relação silte argila é menor que 0,7. Observa-se um alto valor para a massa específica dos sólidos, em razão da presença de ferro no solo do perfil estudado.

Tabela 4.1 – Características físicas, granulometria e a relação silte e argila das amostras de solo do poço n.º 9 do CEEG.

Profundidade (m)	γ_s (g/cm ³)	Limites		IP	Granulometria (NBR 6502/95)				Silte/Argila
		(%)			(%)				
		LL	LP		Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa	
0	3,02	57,5	42,9	14,6	68	19	12	1	0,28
2,45	3,05	56,5	42,2	14,3	73	15	11	0	0,21
6,45	3,01	55,9	44,8	11,1	66	23	11	0	0,35
10,45	3,14	57,3	46,6	10,7	64	33	3	0	0,52
13,45	3,16	58,6	47,3	11,3	63	34	3	0	0,54
14,45	3,04	67,9	52,7	15,2	49	32	16	3	0,65
15,45	3,02	65,7	51,1	14,6	34	41	22	3	1,21
16,45	2,99	69,5	45,6	23,9	33	43	19	5	1,30

Fonte: Christoni & Teixeira (2014, p.14).

De acordo com a Tabela 1 a granulometria do solo apresenta pouca variação, passando de argila siltosa (cota: 0 a 14,45 metros) para um silte argiloso (cota: 15,45 a 16,45 metros). A relação silte/argila é menor que 0,7 para os solos classificados como argila siltosa, e maior que 1 para os solos classificados como silte argiloso. Foi observado um aumento gradativo nos Limites de Plasticidade (LP), no Limite de Liquidez (LL). O aumento do LL e do LP se dá devido à diminuição do teor de Fe₂O₃ (Tabela 4.3) ao longo da profundidade, uma vez que os óxidos de ferro tendem a bloquear a atividade das argilas (EMBRAPA, 2013; ALBULQUERQUE, *et. al.*, 2006). Os valores das massas específica dos sólidos são altos, em razão da presença de ferro no solo do perfil estudado.

Também foram realizadas, por estes autores, análises de pH, matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC), segundo metodologia desenvolvida pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e descrita no Manual de Análise Química de Solo (IAPAR, 1991).

Os índices ki e kr foram medidos, por Christoni & Teixeira (2014). As análises para determinação de ki e kr foram realizadas por ataque sulfúrico, conforme recomendação do manual da EMBRAPA (1999). O ki foi obtido pela relação: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, e quanto menor o seu valor mais intemperizado é o solo. O índice kr foi calculado pela relação: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$, e é utilizado para determinar solo caulíníticos ($\text{kr} > 0,75$) e solo oxídicos ($\text{kr} \leq 0,75$), segundo Silva (2005). Os valores mencionados se referem à análise química do solo que é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características químicas das amostras de solo do poço n.º 9 do CEEG.

Profundidade (m)	pH		ΔpH	CTC ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$)	Matéria Orgânica (g.Kg^{-1})	Ki (%)	Kr (%)
	H2O	KCl					
0	5,6	4,4	-1,2	9,66	22,91	1,47	1,36
2,45	5,1	4,1	-1,0	6,83	6,48	1,32	1,12
6,45	5,4	4,3	-1,1	5,33	3,22	0,60	0,46
10,45	5,2	4,0	-1,2	6,01	1,81	1,33	1,03
13,45	5,2	3,9	-1,3	7,47	4,21	0,96	0,75
14,45	5,0	3,9	-1,1	8,16	5,02	1,04	0,83
15,45	5,3	4,2	-1,1	6,10	2,00	1,00	0,82
16,45	5,3	4,0	-1,3	7,12	3,27	0,87	0,73

Fonte: Christoni & Teixeira (2014, p.14).

Os resultados obtidos na análise química do solo, descritos na Tabela 4.2, são característicos de solos lateríticos e horizonte latossólico, até a cota 10,45m. O pH apresentou valores ácidos, a CTC não passou 10 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, a matéria orgânica foi diminuindo ao longo da profundidade e os resultados de ki foram baixos também, caracterizando alta intemperização do solo e presença de óxidos. Os valores de kr maiores que 0,75 indicam solos caulíníticos e pertencentes ao horizonte B latossólico (EMBRAPA, 1999).

Foram realizados pelas autoras ensaios de fluorescência de raio-x, e análise Térmica Gravimétrica (ATG) juntamente com a Análise Térmica Diferencial (ATD) para a avaliação da composição mineralógica do solo.

Os resultados obtidos pela fluorescência de raio-x (Tabela 4.3) apresentam a evolução do solo estudado, em função dos teores dos elementos maiores. O teor de Fe_2O_3 e Al_2O_3 diminui com a profundidade, enquanto o SiO_2 aumenta e isso indica o comportamento típico de evolução dos perfis latossólicos onde ocorre a lixiviação de bases e silício, restando nos horizontes A e B grandes quantidades de Fe e Al, que por vezes são hidratados e formam os oxihidróxidos e a argila caulinita.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de fluorescência de raio-x nas amostras de solo do poço n.º 9 e um amostra da rocha basáltica.

Profundidade (m)	Fluorescência de raio-x (%)					
	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	CaO
0	44,186	29,330	20,530	4,766	0,405	0,240
2,45	52,000	24,312	17,292	5,232	0,343	0,182
6,45	44,699	29,137	20,480	4,827	0,257	0,114
10,45	56,791	18,284	18,154	5,562	0,370	0,164
13,45	44,038	27,912	22,078	5,005	0,332	0,107
14,45	57,152	18,635	16,888	5,977	0,476	0,162
15,45	43,895	29,133	22,605	3,340	0,374	0,144
16,45	41,141	28,848	25,754	3,369	0,312	0,114
Rocha	15,400	13,700	51,800	2,200	0,240	9,000

Fonte: Christoni & Teixeira (2014, p.15).

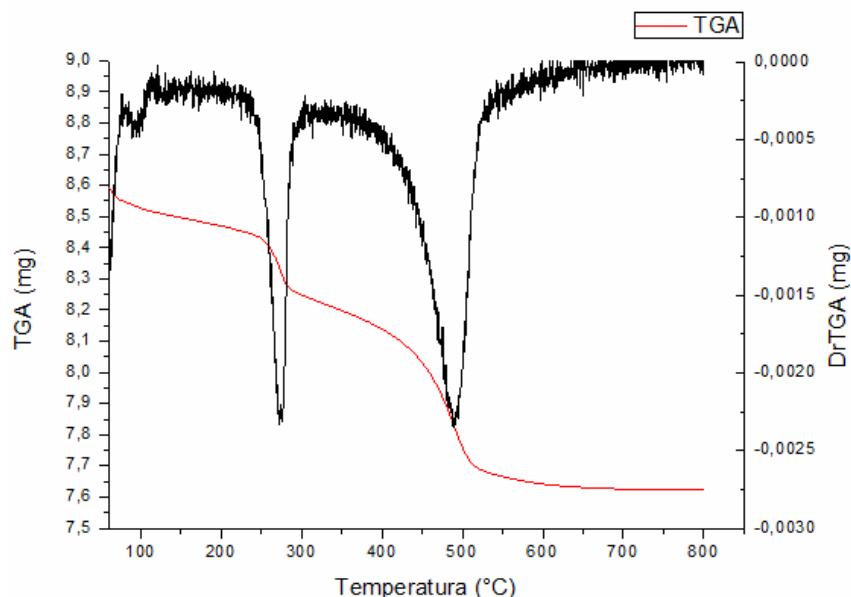
A Tabela 4.4 apresenta a perda de massa em porcentagem para água, gibsita e caulinita das amostras de solo ensaiadas pela ATG. Na curva de TGA referente à profundidade de 2,45 m (Figura 4.3) é possível identificar três picos endotérmicos próximos às temperaturas de 100°C, 300°C e 500°C, atribuídos respectivamente à saída de água, de massa da gibsita e da caulinita. Em média na composição da amostra a 2,45 metros de profundidade foram observadas a presença de cerca de 4,10% de água, 13,11% de gibsita, 47,54% de caulinita, e para completar 100 %, ou seja, 35,25% foram admitidos como sendo óxidos de ferro (goethita, hematita e magnetita), material amorfo e de baixa cristalinidade.

Tabela 4.4 – Perda em massa dos ensaios de ATG para as amostras de solo do poço n.º 9 e um amostra da rocha basáltica.

Profundidade (m)	Água (%)	Gibsita (%)	Caulinita (%)
0	4,13	11,57	38,02
2,45	4,10	13,11	47,54
6,45	4,17	15,28	43,06
10,45	9,09	7,58	48,48
13,45	7,14	5,36	48,21
14,45	9,76	9,76	50,00
15,45	8,43	18,07	40,96
16,45	6,58	11,84	48,68

Fonte: Christoni & Teixeira (2014, p.20).

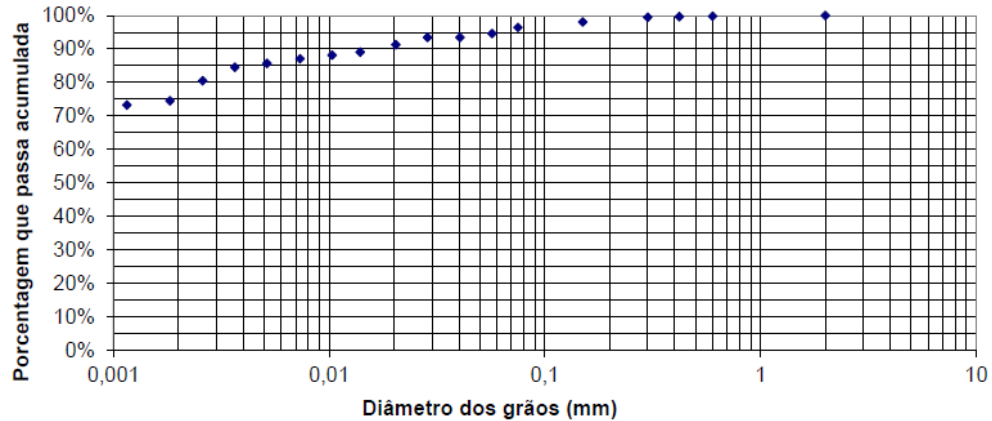
Figura 4.3 – Gráfico de TGA referente à profundidade 2,45 m do solo do poço n.º 9 do CEEG.



Fonte: Christoni & Teixeira (2012, p.16).

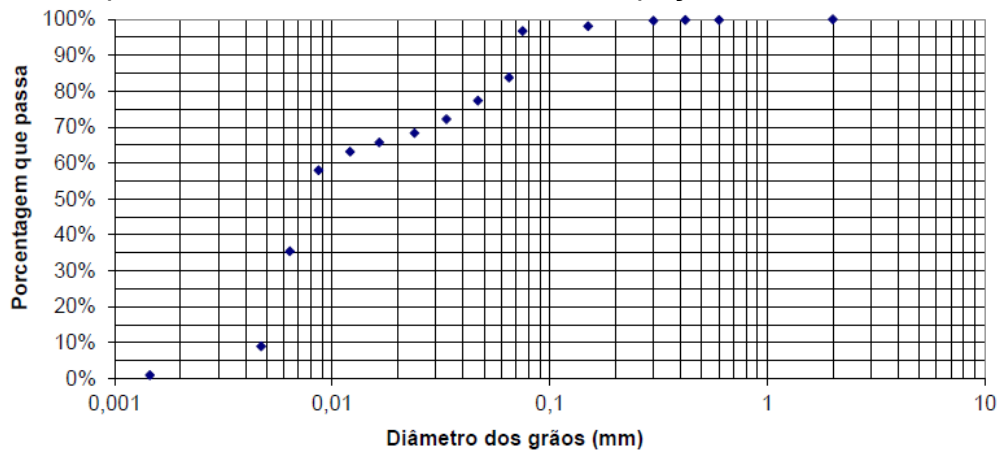
Nos ensaios de granulometria conjunta com o uso de defloculante (Figura 4.4 e Tabela 4.5) e sem o uso de defloculante (Figura 4.5 e Tabela 4.5) para a profundidade de 2 metros do poço n.º 9 do CEEG, o solo é classificado como uma argila siltosa e silte arenoso respectivamente, de acordo com a NBR 6502/95. A diferença entre a classificação do solo explica-se devido ao fato de que o defloculante atua desagregando os grãos maiores formados por aglomerações de partículas menores, apresentando, portanto maior porcentagem de grãos nas frações mais finas do solo.

Figura 4.4 – Curva Granulométrica do solo com o uso de defloculante à profundidade 2,00 metros do solo do poço n.º 9 do CEEG.



Fonte: Miguel *et al.* (2005, p.66).

Figura 4.5 – Curva Granulométrica do solo sem o uso de defloculante à profundidade 2,00 metros do solo do poço n.º 9 do CEEG.



Fonte: Miguel *et al.* (2005, p.67).

Tabela 4.5 – Porcentagens das frações de solo com e sem uso de defloculante a uma profundidade de 2,00 metros do poço n.º 9 do CEEG.

Profundidade 2,0 m	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Pedregulho (%)
Com defloculante	74,50	20,50	3,5	1,35	0,15	0
Sem defloculante	2,50	49,89	17,31	1,33	0,17	0

Fonte: Miguel *et al.* (2005, p.66 e 67).

Segundo o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) o solo a 2,0 metros de profundidade do poço n.º 9 pode ser classificado como um solo tipo CH (Clay High – Argila muito plástica).

Com base análises apresentadas é possível classificar o perfil do solo estudado (do poço 9 do CEEG) como laterítico e com horizonte B latossólico (EMBRAPA,2013). Esta análise também se estende a profundidade em estudo de cota 2,00 metros.

Essa conclusão é baseada nos resultados obtidos a partir dos ensaios de química e mineralogia do solo. Nestes ensaios foram obtidos pH com valores ácidos, ki baixos em torno de 1,32 menores que 2,20 e os valores de kr maiores que 0,75 (característica caulínica). O valor da relação silte/ argila é 0,21 menor que 0,6. Estes valores obtidos são característicos de solos do horizonte B latossólico.

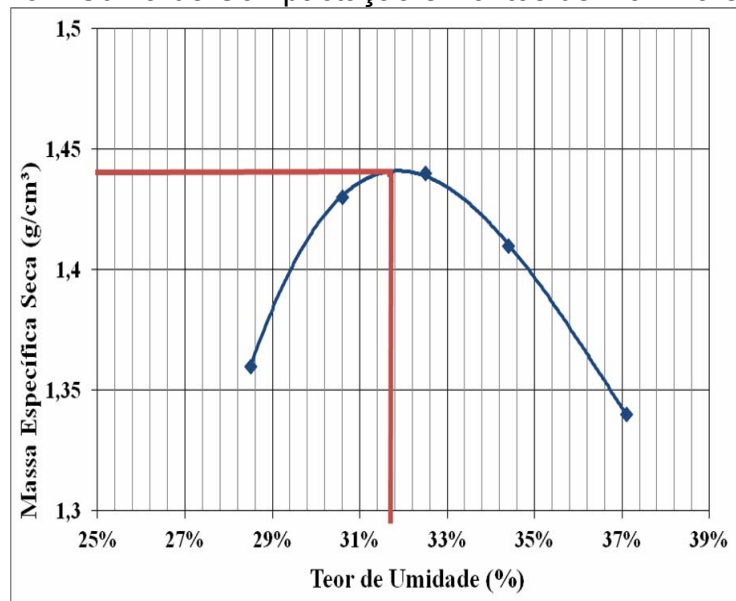
A CTC do solo estudado varia em torno de $6,83 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, não ultrapassando $10 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, sendo este um valor comumente encontrado em solos lateríticos e tropical, evidenciando uma composição mineralógica rica em óxidos de ferro e alumínio. A presença destes elementos é confirmada no ensaio de Fluorescência de raio-x que apresenta elevado teor de Fe_2O_3 e Al_2O_3 , também evidencia a presença em quantidade significativa do elemento SiO_2 . A Análise térmica Gravimétrica ATG juntamente com a Análise Térmica Diferencial ATD, confirmam a presença de água, gibsita, caulinita, e óxidos de ferro (goethita, hematita e magnetita).

Haully (2003) realizou um estudo sobre o comportamento mecânico dos solos compactados na “cava” ao lado do poço n.º 9 a 2,00 metros de profundidade. Primeiramente foram realizados ensaios de compactação na energia Normal de Proctor com o objetivo de obter a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótima, que representa o ponto de máxima eficiência de compactação. Estes valores foram obtidos através da Curva de Compactação (Figura 4.7) e os resultados estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Índices físicos do ponto de máxima eficiência da curva de compactação.

Grau de saturação - Sr (%)	88,90
Índice de Vazios – e (ponto máx.)	1,07
Teor de Umidade Ótimo – W_{ot} (%)	31,70
Massa Específica Seca Máxima - $\rho_{máx}$ (g/cm³)	1,44

Fonte: Haully (2003, p.70).

Figura 4.6 – Curva de Compactação e Pontos de Máxima eficiência.

Fonte: Haully (2003, p.70).

Com o ponto de máxima eficiência de compactação Haully (2003) realizou um estudo sobre as propriedades de comportamento do solo compactado. Nos ensaios de coeficiente de permeabilidade foi encontrado um valor médio de 10^{-7} cm/s. Com os ensaios de adensamento foram obtidos diversos parâmetros relacionados ao fenômeno de adensamento do solo, estes parâmetros na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros de adensamento solo compactado.

Parâmetros	W_{ot} (%)	Embebido
C_c	0,16	0,21
a_v (kPa) ⁻¹	0,00012	0,00016
m_v (kPa) ⁻¹	$5,6 \times 10^{-5}$	$7,3 \times 10^{-5}$
C_v – Método Taylor (cm²/s)	$1,65 \times 10^{-2}$	$0,91 \times 10^{-2}$
C_v – Teoria de Terzaghi (cm²/s)	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
σ'_{VM} (kPa)	160,0	115,0

Fonte: Haully (2003, p.80).

Komori (2012) obteve a partir dos ensaios de adensamento diversos parâmetros relacionados ao fenômeno de adensamento do solo indeformado de amostras coletadas da "cava" ao lado do poço n.º 9 a 2,00 metros de profundidade. Os ensaios foram realizados em amostras na umidade de campo e inundados em água, estes parâmetros encontrados estão na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros de adensamento solo natural.

Parâmetros	Sem inundação	Com inundação
σ'_a (kPa)	53,30	46,93
Cc	0,65	0,65
C_v (cm ² /s)	1,90E-02	1,67E-02
a_v (kPa) ⁻¹	6,25E-04	2,25E-04
m_v (kPa) ⁻¹	1,99E-04	7,57E-05

Fonte: Komori (2003, p.56 e 57).

4.2 AMOSTRAGEM

As amostras indeformadas e deformadas foram coletadas na cava próxima ao poço nove e a uma profundidade aproximadamente dois metros.

As amostras indeformadas foram obtidas através da confecção de dois blocos de aproximadamente 30 x 30 x 30 cm, conforme orienta a NBR 9604/86 e transportados dentro de uma caixa metálica até a câmara úmida do laboratório de Geotécnia da UEL. Porém somente um dos blocos foi utilizado durante os ensaios. Suas faces foram parafinadas para ajudar a manter as condições naturais do solo de campo. A Figura 4.8 retrata o procedimento da coleta das amostras indeformadas e o armazenamento na câmara úmida.

Figura 4.7 – Confecção e armazenamento do bloco 30X30X30 cm.



Fonte: o próprio autor.

As amostras de solo deformadas foram retiradas da mesma cava e obtidas conforme NBR 9604/86. Estas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetadas e utilizadas para ensaios de caracterização físico-química do solo. Para a utilização destas amostras foi necessário prepara-las

de acordo com as orientações da NBR 6457/86 para amostras com secagem prévia. Então, as amostras foram secas ao ar livre, na temperatura ambiente do laboratório, e depois destorroadas em um almofariz usando a mão de gral. Por fim, o solo foi peneirado pela peneira nº10 (2 mm de abertura).

4.3 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Duas amostras deformadas e preparadas (secas e destorroadas) com cerca de 50 gramas do solo foram encaminhadas para a realização da análise química. Essa análise permitiu obter os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e alumínio (Al), extraídos com KCL e pH determinado com CaCl_2 e em água. Também foi obtida a soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases e saturação por alumínio. Os ensaios de caracterização química do solo foram realizados no Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), segundo metodologia própria e descrita no Manual de Análise Química de Solo (IAPAR, 1991).

4.4 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Esta análise foi realizada a fim de detalhar os argilominerais e os óxidos das amostras de solo. As amostras de solo usadas na DRX também foram secas ao ar, em temperatura ambiente, e destorroadas.

As medidas de Difração de Raios X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X do LARX (Laboratório Multiusuário da Pró Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação), da UEL, em um difratômetro da marca PANalytical, modelo X'Pert PRO MPD e com radiação $\text{CuK}\alpha$, usando a técnica conhecida como θ - 2θ (Figura 4.8). A tensão e a corrente usadas foram 40 KV e 30 mA, respectivamente. O intervalo de varredura 2θ utilizado foi de 5 a 70 °, com passo angular de 0,03 °. O tempo de contagem por ponto foi de 4,0 s. Para desprezar possíveis orientações preferenciais no processo de preparação das amostras, estas foram giradas ciclicamente durante o processo de medida com um período de 2 segundos.

Figura 4.8 – Difratorômetro.



Fonte: o próprio autor

4.5 AVALIAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DE SOLO ARGILOSO PELO ENSAIO DE TORRÃO (*CRUMB TEST*)

O ensaio de dispersão do solo foi feito com o intuito de classificar o solo em dispersivo e não dispersivo, para realizar uma correlação entre o grau de dispersão e o comportamento do solo apresentado no ensaio edométrico simples e duplo. Este ensaio foi realizado em seis fluidos diferentes, sendo eles: água, hexametáfosfato de sódio, uma mistura de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio, uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio, uma solução de NaOH 0,001N, e lixiviado, embora a NBR 13601/1996 prescreva que o ensaio seja executado somente em água destilada.

Portanto, para realizar o ensaio de avaliação da dispersibilidade do solo pelo ensaio de torrão foi necessário preparar uma solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,001N) na seguinte razão: 0,04 g de hidróxido de sódio para 1 litro de água destilada.

Da amostra indeformada do solo foram retirados três torrões de aproximadamente 20 gramas (Figura 4.10 a). Em cada béquer contendo um dos fluidos utilizados foi colocado um torrão de solo e observado seu comportamento durante cerca de uma hora (Figura 4.10 b). Após este período, foi realizada a sua análise e classificação de acordo com a NBR 13601 (1996), em função do seu grau de desprendimento.

Figura 4.9 – (a) Torrão de solo talhado de uma amostra indeformada para a realização do *crumb test*. (b) e sendo colocado em um béquer contendo água destilada



Fonte: o próprio autor; Manso (2011, p.48)

A norma NBR 13601 (1996) classifica de acordo com o comportamento apresentado pelo torrão, o solo em dispersivo e não dispersivo, atribuindo ainda um determinado grau, obtido por meio de observação do ensaio. Dessa forma classifica-se como não-dispersivo amostras com grau atribuído por 1 ou 2, ou dispersivo, se o grau atribuído for 3 ou 4, de acordo com o comportamento médio dos torrões. Esta classificação é subjetiva.

O Grau 1 é definido como sem ocorrência de reação, em que a amostra fica inalterada no final do ensaio sem que o fluido apresente turbidez. O Grau 2 é classificado pela ocorrência de pequena reação, o fluido apresenta apenas uma pequena turbidez na superfície da amostra. No Grau 3 ocorre a reação moderada em que se observa uma turbidez com uma fina camada de partículas no fundo do béquer. Por fim, no grau 4 observa-se forte reação com o material em suspensão cobrindo o fundo do béquer, podendo o fluido se tornar turvo.

4.6 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Conforme explica Camargo *et al.* (1986) a condutividade elétrica permite analisar a salinidade de um solo, ou seja, a concentração de íons solúveis, que pode ser considerada aproximadamente proporcional à quantidade de sal da solução. Segundo o mesmo autor “o método de preparar o extrato, ou seja, a proporção água: solo depende do propósito da determinação e da precisão necessária”. Neste estudo o objetivo é conhecer a salinidade do solo e por isso foi

utilizada uma proporção de 1:1(água: solo). Para estimar a salinidade do solo foi usado um condutímetro (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Condutímetro.



Fonte: do próprio autor.

No condutímetro é possível determinar a condutividade elétrica do extrato aquoso colocando a solução entre dois eletrodos de geometria constante separados por uma distância conhecida. Quando um potencial elétrico é aplicado, a quantidade de corrente varia diretamente com a concentração total de sais dissolvidos.

Para a realização do ensaio foi preciso ter os seguintes reagentes e soluções: a) Solução de limpeza do eletrodo: juntar 100 ml de álcool isopropílico, 100 ml de éter etílico, 50 ml de ácido clorídrico concentrado e 50 ml de água deionizada; b) Água deionizada.

O procedimento: pesou-se 100 g de TFSA (terra fina seca ao ar), adicionou-se 100 ml de água deionizada, agitou-se manualmente por trinta segundos, a cada meia hora, cinco vezes, durante duas horas (Figura 4.11). Após este procedimento filtrou-se lentamente a mistura em papel filtro (Whatman nº 42) e procedeu-se à leitura no condutímetro.

Figura 4.11 – 100 g de TFSA misturada em 100 ml de água deionizada.



Fonte: do próprio autor.

É preciso salientar que os eletrodos devem estar sempre limpos para que não haja formação de bolha de ar, diminuindo a área de contato. A secagem do eletrodo, depois de lavado com água de uma amostra para outra, deve ser feita com jato de ar comprimido.

As medidas de condutibilidade elétrica do extrato aquoso foram realizadas no Laboratório de Química da UEL, o método utilizado foi o proposto por Camargo *et al.* (1986). As medidas de condutibilidade elétrica dos fluidos de inundação também foram obtidas segundo o método proposto por Camargo *et al.* (1986).

4.7 ENSAIO EDOMÉTRICO

Para a avaliação do índice de colapso dos solos foram realizados ensaios edométricos duplos e simples, usando amostras do tipo indeformada. Os ensaios duplos consistem na comparação entre ensaios realizados com inundação inicial e sem inundação inicial, enquanto os ensaios simples compreendem a realização de ensaios com amostras inicialmente na umidade natural e posteriormente inundadas em determinado carregamento de interesse. Os fluidos de inundação nos ensaios duplos e simples foram: água; lixiviado e duas soluções preparadas em laboratório (hexametáfosfato ácido e básico).

Tanto nos ensaios duplos como nos simples, foi utilizado o método de ensaio da NBR 12007. As cargas utilizadas durante os ensaios foram de 6 kPa, 12 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa.

O corpo de prova foi moldado a partir da amostra indeformada, sendo talhado por meio da cravação do anel metálico com diâmetro 8 cm e altura 3,2

cm, com cuidado para que não ocasionasse a perturbação do solo. Após a moldagem o corpo de prova foi pesado junto com o anel em uma balança eletrônica, de precisão 0,01 g. Com as sobras da moldagem dos corpos de prova foi feita a determinação do teor de umidade inicial. O teor de umidade inicial foi obtido seguindo a ABNT-NBR 6457/86 (Anexo – Determinação de Teor de Umidade de Solos).

Em seguida foi realizada a montagem da célula de adensamento, com a fixação da base e pedra porosa, papel filtro, corpo de prova, papel filtro, pedra porosa e cabeçote, respectivamente no interior da célula. É válido salientar que na montagem do ensaio colocam-se papéis filtro e pedras porosas uma na face inferior e outra na superior dos corpos de prova, que representaram as duas faces drenantes. As pedras porosas foram usadas no teor de umidade ambiente.

Durante cada estágio de carregamento foram feitas leituras da variação da altura do corpo de prova ao longo do tempo através de um extensômetro. As leituras foram realizadas no extensômetro nos tempos estabelecidos para os instantes 8, 15 e 30 s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas, após o início do ensaio. Passadas às 24 horas a carga aplicada foi dobrada e realizadas novamente as leituras como descrito anteriormente, repetindo esse processo em todos os estágios de carregamentos.

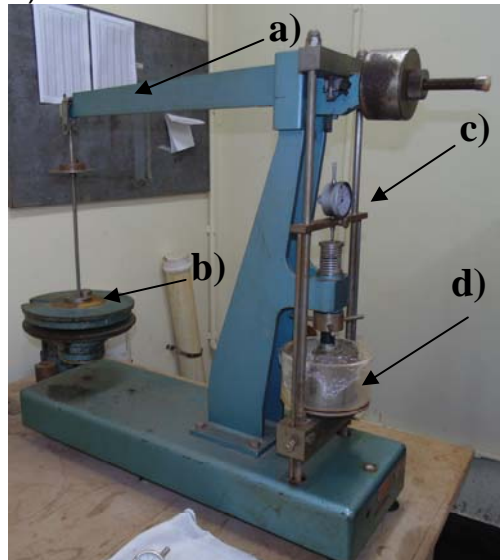
Depois de atingida a carga máxima do ensaio, iniciaram-se os estágios de descarregamentos, semelhante ao de carregamento. Nos estágios de descarregamento o processo de leituras é similar ao anterior, porém este foi realizado com o tempo reduzido para os estágios de leitura instantes 8, 15 e 30 s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos e 1, 2 horas, em cada estágio de descarregamento sendo eles, 200 kPa, 100 kPa, 6 kPa. A redução do tempo foi adotado a partir da observação do comportamento de variação da altura da amostra, onde após 2 horas de intervalo de tempo, a mesma não se alterou em um valor significativo no extensômetro. Terminado o ensaio pesou-se novamente o conjunto corpo de prova mais anel.

O teor de umidade, a massa específica do solo, a massa específica seca, o índice de vazios e o grau de saturação do solo ensaiado, foram determinados para o solo antes e depois do ensaio.

A Figura 4.12 ilustra a prensa de adensamento unidirecional e seus componentes. A prensa de adensamento ilustrada apresenta um estágio de

carregamento. A prensa é composta por um suporte para os carregamentos na parte traseira, apoiado em um braço que transmite os esforços para a célula de adensamento e um extensômetro para leitura das deformações.

Figura 4.12 – Prensa de adensamento: a) um braço que transmite os esforços carregamentos, b) suporte para as cargas, c) Extensômetro, d) Célula de adensamento.



Fonte: o próprio autor

4.7.1 Ensaio Edométrico Duplo

O ensaio edométrico duplo consiste na realização de dois ensaios, um com o corpo de prova no teor de umidade natural de campo e outro com o corpo de prova inundado desde o início do ensaio. Os ensaios foram realizados segundo a NBR 12007 e os procedimentos descritos no item 4.7.

4.7.2 Ensaio Edométrico Simples

Nos ensaios edométricos simples o corpo de prova foi carregado inicialmente no teor de umidade de campo. Este foi solicitado até uma carga de interesse, após este estágio de carregamento e estabilização das deformações do corpo de prova, adicionou-se o fluido de inundação para que houvesse o aumento do grau de saturação. Neste momento foram realizadas as leituras do extensômetro nos tempos designados, após 24 horas continuaram-se os estágios de

carregamento e descarregamento até o término do ensaio. O ensaio seguiu as prescrições da NBR 12007, e os procedimentos descritos no item 4.7.

As tensões escolhidas para os estágios de inundação foram à tensão de pré-adensamento virtual, um carregamento inferior ao da tensão de pré-adensamento e um superior a esta tensão. A tensão de pré-adensamento virtual encontrada no solo estudado foi de aproximadamente de 80 kPa. Baseada nas cargas de carregamento pré-estabelecidas no início do estudo foram usadas às cargas de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa para as inundações.

4.8 FLUIDOS DE INUNDAÇÃO

Para a avaliação da influência dos fluidos de inundação no colapso do solo foram utilizados quatro líquidos distintos: água, lixiviado, uma solução ácida preparada em laboratório – hexametáfosfato de sódio (NaPO_3)₆ com adição de ácido fosfórico (H_3PO_4), uma solução alcalina preparada em laboratório - hexametáfosfato de sódio (NaPO_3)₆ com adição de hidróxido de sódio (NaOH (6N)).

O lixiviado utilizado foi proveniente do antigo depósito de resíduos Sólidos Urbano (“lixão”) de Londrina, situado as margens da Estrada do Limoeiro, na região leste. O “lixão” começou a receber lixo na década de 70 e atualmente se encontra desativado. O lixiviado encontrado na lagoa de aeração (Figura 4.13) é considerado “velho”. A Tabela 4.9 apresenta as características do lixiviado utilizado e a Figura 4.14 mostra o recipiente de armazenamento do chorume em laboratório.

Figura 4.13 – Local de coleta do Chorume – lagoa de aeração.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.14 – Armazenamento do chorume em laboratório.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 4.9 – Caracterização do Lixiviado do antigo depósito de lixo de Londrina.

Parâmetros Medidos	Unidade	Valores Médios
Temperatura	°C	24,1
pH	-	8,4
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /l	5900,2
N-Amoniacal	mg N-NH ₃ /l	1048,4
NKT	mg N-NH ₃ /l	1218,3
N-Org.	mg N-NH ₃ /l	180,1
Nitrito	mg N-NO ₂ ⁻ /l	0,7
Nitrato	mg N-NO ₂ ⁻ /l	3,2
DBO Total	mg O ₂ /l	144,2
DQO Total	mg O ₂ /l	2839,2
DQO Filtrada	mg O ₂ /l	3025,3

Fonte: Moretto (2013).

Em um primeiro momento foram escolhidos quatro fluidos de inundação em condições reais, que pudessem realmente influenciar no potencial de colapso do solo estudado. Porém estes fluidos são muito variáveis, o que ocasiona dificuldades na execução dos ensaios, por exemplo caso faltasse fluido seria muito difícil coletar outro com as mesmas características. Por este motivo, o critério adotado consistiu em preparar soluções em laboratório. Porém dois fluidos utilizados foram coletados em campo o lixiviado e a água.

As soluções preparadas em laboratório foram de hexametáfosfato de sódio na razão de 45,7 g de sal para 1 litro de água destilada. Solução esta que foi denominada solução de hexametáfosfato de sódio e apresentou um pH=5,7. A partir desta solução foi preparada a solução ácida e a básica.

Para a solução alcalina foi feita a mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio até atingir o pH=12,0, adicionando-se 10,3 ml da solução

de NaOH (6N) em meio litro da solução de $(\text{NaPO}_3)_6$. Para a solução ácida o procedimento foi o mesmo, o ácido fosfórico foi misturado em hexametáfosfato de sódio até atingir o $\text{pH}=2,4$; adicionando-se 1,8 ml da solução de H_3PO_4 em meio litro da solução de $(\text{NaPO}_3)_6$.

Então, para os ensaios edométricos foram utilizados quatro fluidos de inundação, sendo estes: o lixiviado e as duas soluções preparadas em laboratório, e a água que apresentou um pH médio de 7,20.

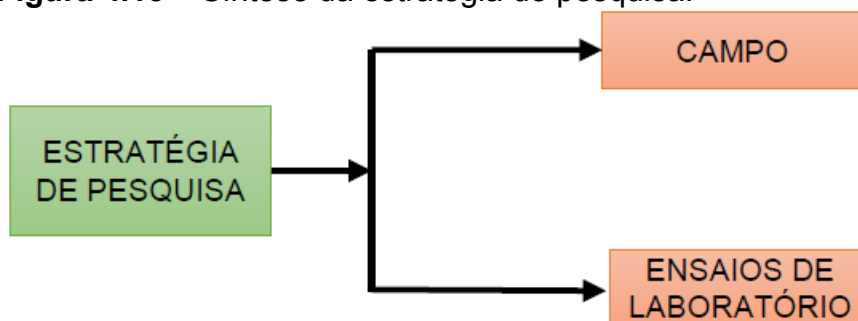
As soluções de laboratórios utilizadas foram à mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio que pode ser encontrada em detergentes, no fluido resultante do processo de revelação fotográfica, no efluente de indústria de fabricação de papel e a mistura de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio que pode ser encontrado no efluente de indústrias alimentícias.

A solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,001N) utilizada somente no ensaio de dispersabilidade de solo argiloso apresentou um pH de 10,42. As soluções já mencionadas anteriormente também foram utilizadas para a avaliação da dispersabilidade do solo pelo ensaio de torrão.

4.9 SÍNTESE DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

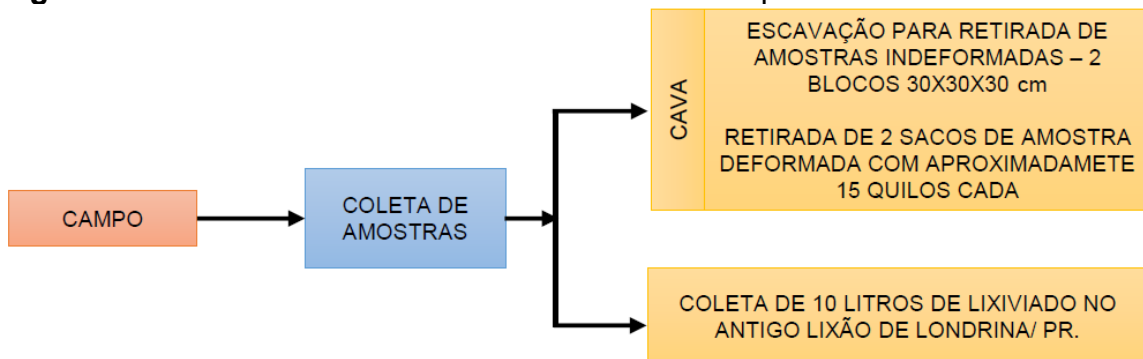
A Figura 4.15 a 4.20 apresentam um esquema resumido da síntese das coletas de amostras realizadas em campo e dos ensaios realizados em laboratório, para a obtenção dos dados referentes à caracterização química e mineralógica do solo e os valores de potencial de colapso para a avaliação do mesmo.

Figura 4.15 – Síntese da estratégia de pesquisa.



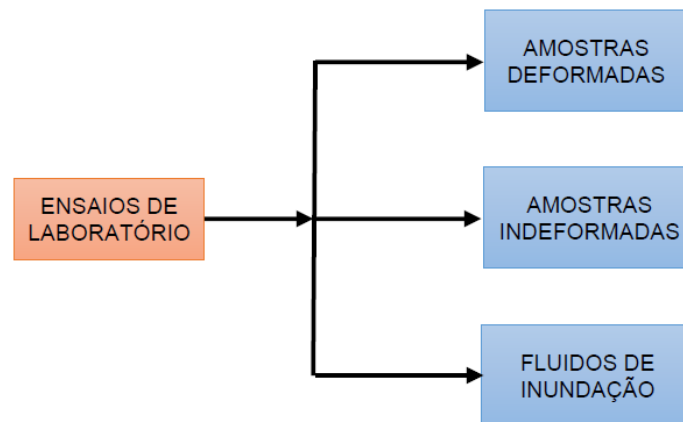
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.16 – Síntese da coleta de amostras em campo.



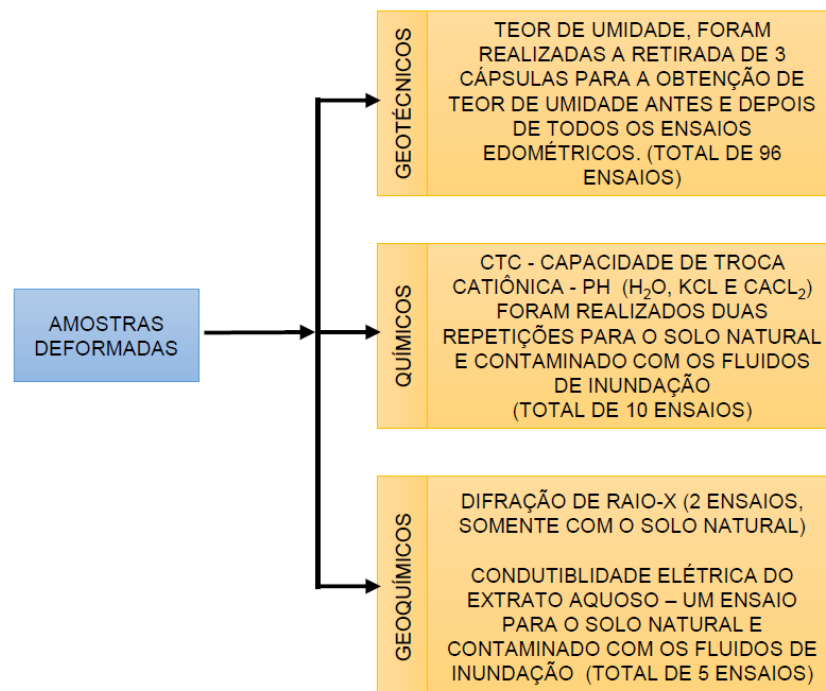
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.17 – Síntese dos materiais usados nos ensaios de laboratório.



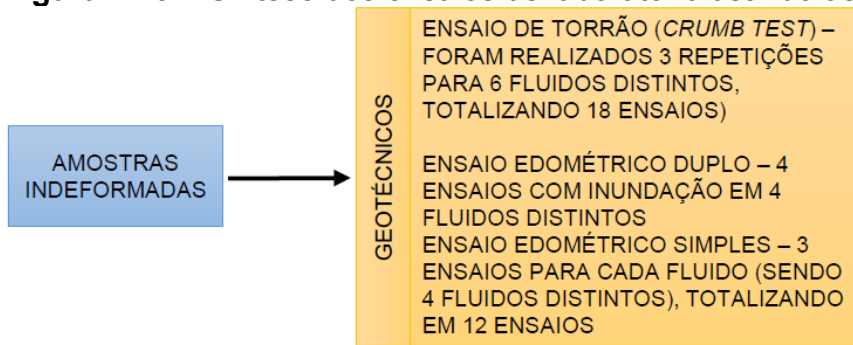
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.18 – Síntese dos ensaios de laboratório usando as amostras deformadas.



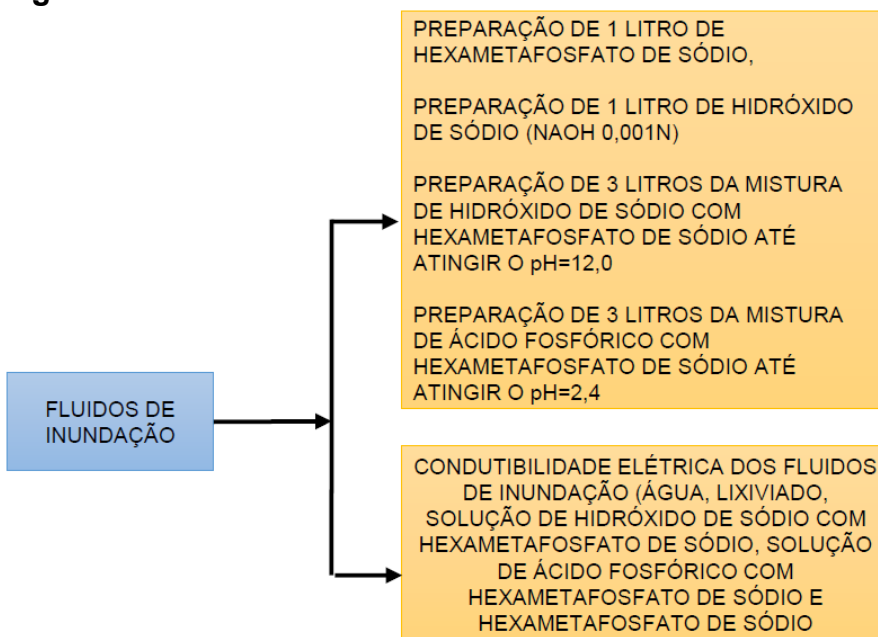
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.19 – Síntese dos ensaios de laboratório usando as amostras indeformadas.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.20 – Síntese dos ensaios de laboratório usando os fluidos de inundação.



Fonte: o próprio autor.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES PRELIMINARES

5.1 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

O objetivo principal desse ensaio foi à determinação do pH, e da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. A Tabela 5.1 apresenta os principais dados fornecidos por meio da análise química do solo do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) a 2,0 m de profundidade.

Tabela 5.1 – Análise química das duas amostras de solo de 2,0 m de profundidade do CEEG

Parâmetros Medidos	Unidade	Valores amostra 01	Valores amostra 02	Valores Médios
P	mg/ dm ³	2,4	1,3	1,85
C	g/ dm ³	3,89	3,81	3,85
pH (CaCl ₂)	-	4,6	4,6	4,6
pH (H ₂ O)	-	5,1	5,1	5,1
pH (KCl)	-	4,4	4,4	4,4
ΔpH	-	-0,7	-0,7	-0,7
Al	cmol _c /dm ³	0,12	0,13	0,12
H+Al	cmol _c /dm ³	5,76	5,76	5,76
Ca	cmol _c /dm ³	0,8	0,77	0,79
Mg	cmol _c /dm ³	0,2	0,16	0,18
K	cmol _c /dm ³	0,12	0,12	0,12
Soma de bases	cmol _c /dm ³	1,12	1,05	1,09
Capacidade de troca de cátions	cmol _c /dm ³	6,88	6,81	6,84
Saturação por Base	%	16,27	15,41	15,84
Saturação por Alumínio	%	9,67	11,01	10,34
Matéria Orgânica	g.kg ⁻¹	6,69	6,55	6,62

Fonte: do próprio autor

Onde: matéria orgânica (M.O.) foi obtida pela relação → M.O. = 1,72.C

ΔpH = pH (KCl) – pH (H₂O).

Os valores de pH obtidos tanto por CaCl₂, KCl e H₂O do solo são baixos, caracterizando-os como sendo quimicamente ácido, ou seja, ocorre o predomínio de cargas elétricas positivas no solo. O ΔpH apresentou valores

negativos, sendo esta característica geralmente encontrada em solos lateríticos (EMBRAPA, 2013). Os solos tropicais apresentam baixo pH, característica esta que facilita a dissociação dos íons da matéria orgânica, criando cargas negativas em pH relativamente baixo. Essa propriedade faz com que a matéria orgânica seja a principal fonte de cargas elétricas negativas nos solos das regiões tropicais e subtropicais (solos muito intemperizados), onde predominam minerais do tipo 1:1, como a caulinita que apresenta poucas cargas negativas (MEURER *et al*, 2004). O solo apresenta teor de matéria orgânica baixa segundo Muzilli (1978), ou seja, menor que 14 g.kg^{-1} .

A capacidade de troca de cátions (CTC) expressa à quantidade de cátions que o solo pode reter na forma de complexos de esfera-externa. A acidez do solo tem um efeito direto na atividade de íons H^+ e um efeito indireto na disponibilidade de nutrientes dada pela CTC. Os solos tropicais geralmente têm baixa CTC em razão dos altos teores de óxidos de ferro e alumínio. A CTC do solo estudado varia em torno de $6,84 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, sendo este um valor comumente encontrado em solos lateríticos e tropical, evidenciando uma composição mineralógica rica em óxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2013).

5.1.1 Análise Química do Solo Inundado em Diversos Fluidos de Inundação

A Tabela 5.2 apresenta um resumo geral das análises químicas do solo inundado em fluidos diversos. Estas análises foram realizadas no solo no estado natural e após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, com o intuito de verificar as possíveis mudanças ocasionadas pelas substâncias nas amostras de solo. Foram realizadas duas repetições para cada amostra de solo, totalizando um conjunto de 10 (dez) ensaios. O Tabela 5.2 apresenta uma média dos valores obtidos nos ensaios de química do solo (ANEXO B).

Os fluidos de inundação utilizados foram: água (pH=7,20, lixiviado (pH=8,4), duas soluções preparadas em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

Tabela 5.2 – Análise química do solo no estado natural e após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, em amostras de 2,0 m de profundidade do CEEG.

Parâmetros Medidos	Unidade	Solo natural	Solo inundado em água	Solo inundado em lixiviado	Solo inundado na mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	Solo Inundado na mistura de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio
P	mg/ dm ³	1,85	2,75	2,55	771,85	2327,25
C	g/ dm ³	3,85	2,26	2,60	2,36	1,73
pH (CaCl ₂)	-	4,6	4,5	4,40	5,50	5,00
pH (H ₂ O)	-	5,1	4,5	4,40	6,60	6,00
pH (KCl)	-	4,4	4,5	4,50	4,80	4,40
ΔpH	-	-0,7	0	0,10	-2,20	-1,60
Al	cmol _c /dm ³	0,12	0,19	0,07	0,14	1,06
H+Al	cmol _c /dm ³	5,76	5,34	5,34	7,20	10,45
Ca	cmol _c /dm ³	0,79	0,57	0,91	0,35	0,25
Mg	cmol _c /dm ³	0,18	0,16	0,76	0,20	0,20
K	cmol _c /dm ³	0,12	0,06	2,50	0,10	0,10
Soma de Base	cmol _c /dm ³	1,09	0,79	4,17	0,65	0,55
Capacidade de troca de cátions	cmol _c /dm ³	6,84	6,13	9,51	7,85	11,00
Saturação por Base	%	15,84	12,88	43,84	8,28	5,00
Saturação por Alumínio	%	10,34	19,38	1,64	17,72	65,85
Matéria Orgânica	g.kg ⁻¹	6,62	3,88	4,49	4,05	2,98

Fonte: do próprio autor

Onde: matéria orgânica (M.O.) foi obtida pela relação → $M.O. = 1,72.C$

$\Delta pH = pH (KCl) - pH (H_2O)$.

Os valores de pH obtidos tanto por CaCl_2 , KCl e H_2O do solo após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação são baixos, não alterando as características do solo natural, ou seja, os solos continuam quimicamente ácidos. Mas os valores de pH do solo inundado nos fluidos preparados em laboratório tiveram um aumento em relação ao pH do solo natural e isso é justificado devido à adição de fosfato no solo. A adsorção específica (o acúmulo de um determinado elemento ou substância na interface entre a superfície sólida e a moléculas de um fluido) do anión fósforo tende a aumentar a carga negativa da solução do solo (fase aquosa do solo localizada nos poros do solo) e conseqüentemente diminuem as cargas positivas, conseqüentemente aumentam o valor do pH (MEURER *et al*, 2004).

O ΔpH encontrado nos solos inundados nas soluções de laboratório se apresentaram negativos, mantendo as características do solo natural e dos solos lateríticos, porém seus valores aumentaram expressivamente. Segundo Meurer *et al* (2004) isso também pode ser correlacionado a adição de fósforo na solução do solo, pois com a redução das cargas positivas ocorre um aumento nas cargas negativas que são evidenciadas no valor negativo do ΔpH , uma vez que estes valores indicam que a carga líquida das partículas está negativa. Já nos valores encontrados nos solos inundados em água e lixiviado o ΔpH se mostrou nulo e positivo, respectivamente, indicando que o solo apresenta uma alta mobilidade de argila (EMBRAPA, 2013).

Observa-se também um aumento considerável de fósforo nos solos inundados na solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio e na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio. Isto ocorre devido à adição de fósforo pelas soluções, ricas neste elemento, e no caso da segunda solução a adição foi bem maior que a primeira solução. Por este motivo foi com essa solução a maior quantidade de fósforo das análises químicas do solo.

Para todos os solos inundados, nos fluidos distintos, e após o ensaio edométrico foram encontrados teores de matéria orgânica baixas, menores que 14 g.kg^{-1} (MUZILLI, 1978). Os valores de matéria orgânica estão correlacionados com o carbono orgânico do solo, portanto quando ocorre uma diminuição de matéria orgânica no solo também haverá uma diminuição dos compostos de carbono do solo. A matéria orgânica do solo atua como um agente cimentante deste,

aumentando assim a sua resistência aparente, conforme explica Meurer *et al*, (2004). Segundo o mesmo autor a diminuição do carbono resulta num aumento do valor do pH, isso pode ser evidenciado nos resultados obtidos que apresentam relativo aumento do pH nos solos inundados na solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio e conseqüentemente é observado uma redução clara no teor de carbono e matéria orgânica. Esse fenômeno pode ser explicado devido à adição de fósforo na solução do solo. Isso também é evidenciado para os solos inundados nas outras soluções, porém os valores não são tão expressivos.

Os valores da CTC encontradas nos solos inundados, nos fluidos usados, foi menor que $17 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, valor característico de solos Lateríticos (EMBRAPA, 2013). Um dos indícios para o aumento do valor da CTC é o aumento da adição de ânions de fósforo a solução do solo (MEURER *et al*, 2004). Nas análises químicas dos solos ensaiados este aumento foi observado e possivelmente causado pelas soluções preparadas em laboratório que adicionaram ao solo ânions de fósforo.

Na amostra de solo inundado com lixiviado ocorre um aumento expressivo nas bases trocáveis: o potássio (K^+), o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}). Isso ocorreu principalmente com o potássio e conseqüentemente ocorreu aumento na CTC, que representa a quantidade de cátions (íon de positiva) retidos na superfície do solo. Neste caso em específico, segundo Meurer *et al* (2004), o lixiviado (rico em matéria orgânica) é adsorvido ao solo (devido à presença da caulinita e dos óxidos de ferro) e aumenta a CTC, causando conseqüentemente um aumento significativo na soma de bases desta amostra.

A saturação de bases ($V\% = 100 \times S/T$) se refere à relação de proporção de cátions trocáveis em relação à soma de bases. Os solos estudados apresentaram “baixa saturação”, pois os valores foram inferiores a 50%. O solo inundado em lixiviado apresentou valores maiores devido ao aumento nas bases trocáveis, por causa da composição do lixiviado.

O alumínio expresso na análise química do solo é representado pela somatória de todas as formas de alumínio encontradas na solução de solo (na forma: “livre” $[\text{Al}^{3+}]$, de $[\text{AlOH}^{2+}]$, ligado ao ânions sulfato $[\text{AlSO}_4^+]$ e complexado por ligantes orgânicos $[\text{Al L}]$). O teor de alumínio encontrado nos solos inundados em diferentes fluidos se manteve basicamente inalterável em relação aos valores

encontrados no solo natural, exceto no solo inundado com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio.

Nas amostras dos solos inundados com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio ocorreu um aumento expressivo de alumínio, provavelmente devido à predominância de fosfatos associados a alumínio em solos ácidos quando alagados, já que o solo analisado foi inundado até a saturação de 100% com uma solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio, com elevado teor de fósforo, conforme explica Meurer *et al*, (2004). Este autor ainda salienta que poderá ocorrer também um aumento do pH, fato indicado na análise química desta amostra.

Na análise química do solo ocorreu aumento no valor de H+Al ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) no solo inundado nas soluções preparadas em laboratório, provocada pela reação química ocorrida entre a solução do solo e o fluido de inundação, aumentando o hidrogênio covalente (ligações químicas onde ocorrem compartilhamento de elétrons).

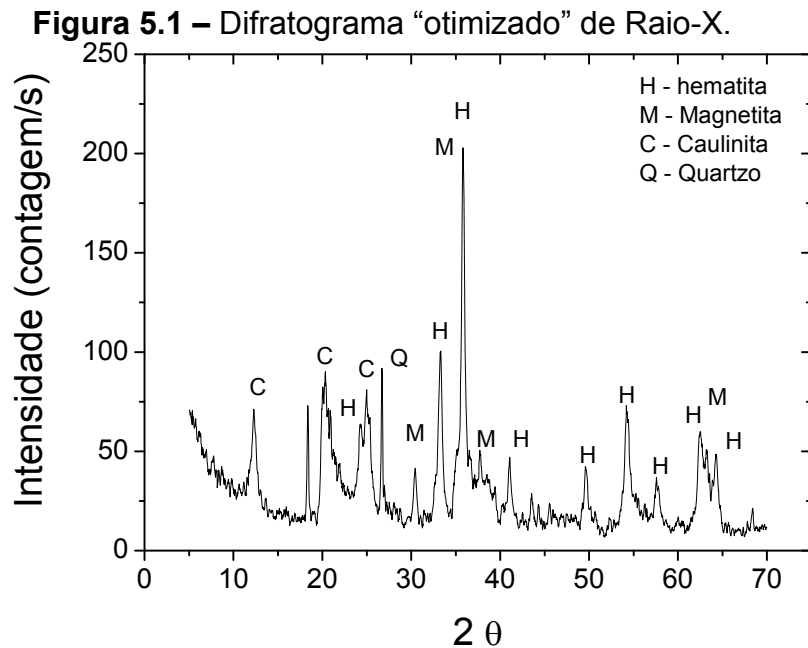
A saturação por alumínio é expressa pela proporção de alumínio trocável na soma de base ($\text{SAI} = \text{Al} \cdot 100 / (\text{SB} + \text{Al})$). Quanto maior for a soma de bases menor será a saturação por alumínio e este efeito pode ser observado na amostra de solo inundado em lixiviado. No solo inundado com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio ocorreu um aumento expressivo na saturação por alumínio, pois nesta amostra de solo foi verificado valor alto de alumínio e conseqüentemente baixo valor na soma de bases.

É preciso salientar que a adição de fósforo na solução de solo provocou as maiores influências nas características químicas do solo, após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, em relação à análise química do solo natural.

5.2 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX)

A Difração de Raio X (DRX) foi realizada em duas amostras de solo. Como as amostras não apresentaram um alto grau de cristalinidade, foram realizadas 4 (quatro) medidas com configurações diferentes, tentando melhorar a resposta da amostra, que foi a mesma. A Figura 5.1 apresenta o difratograma que mostrou a melhor resposta, bem como a indicação dos picos principais. A Tabela 5.3

apresenta os padrões utilizados para indexar o difratograma.



Fonte: do próprio autor.

Tabela 5.3 – Padrões utilizados no difratograma.

Nome do composto	Fórmula Química
Hematita	Fe_2O_3
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Quartzo	SiO_2
Magnetita	Fe_3O_4

Fonte: do próprio autor

Observa-se neste difratograma “otimizado” que o pico principal é da hematita seguido por um outro que é da Magnetita. Foram também observadas a ocorrência de Caulinita e Quartzo.

Pode-se concluir através do difratograma de Raio-X que os principais constituintes mineralógicos do solo estudado são: Hematita, Magnetita, Caulinita, Quartzo. Portanto existe a ocorrência de óxidos de ferro na forma de Hematita e Magnetita, como importante constituinte da fração de argila. A presença destes minérios caracteriza o solo do CEEG como sendo laterítico, pois estes solos tem a fração de argila constituída por minerais cauliníticos e uma elevada concentração de óxidos de ferro, que dão ao solo uma coloração avermelhada.

5.3 AVALIAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DE SOLO ARGILOSO PELO ENSAIO DE TORRÃO (*CRUMB TEST*)

Para a realização do ensaio foram talhados três torrões, a partir da amostra indeformada do solo, de aproximadamente 20 gramas (Figura 5.2) para cada fluido de interesse. Foram preparados três béqueres, colocados os torrões de solo, e observado seu comportamento durante cerca de uma hora (foram observados o comportamento da formação da nuvem, a cada 15 minutos). Após este período, foi realizada a análise da dispersão e classificação de acordo com a NBR 13601 (1996), em função do seu grau de desprendimento.

O ensaio de dispersão de solo (*Crumb Test*) foi realizado usando os seis fluidos: água com pH=7,2 (Figura 5.3), hexametáfosfato de sódio com pH=5,7 (Figura 5.4), uma mistura de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio com pH=12,0 (Figura 5.5), uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio com pH=2,4 (Figura 5.6), uma solução de NaOH 0,001N com pH=13,2 (Figura 5.7), e lixiviado com pH=8,4 (Figura 5.8).

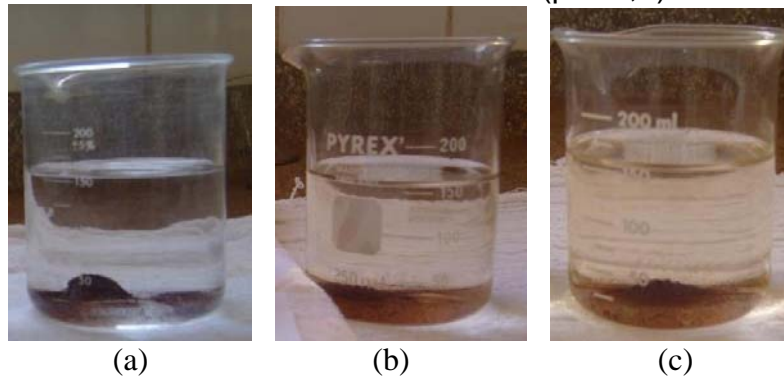
Figura 5.2 – Torrão de solo talhado de uma amostra indeformada para a realização do *Crumb Test*.



Fonte: o próprio autor.

Os torrões imersos em água (pH=7,2), em hexametáfosfato de sódio (pH=5,7), em uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) foram classificados em grau 2, pois ocorreu pequena reação, pois o fluido apresentou apenas uma pequena turbidez na superfície da amostra, como mostra a sequência das imagens da Figura 5.3.

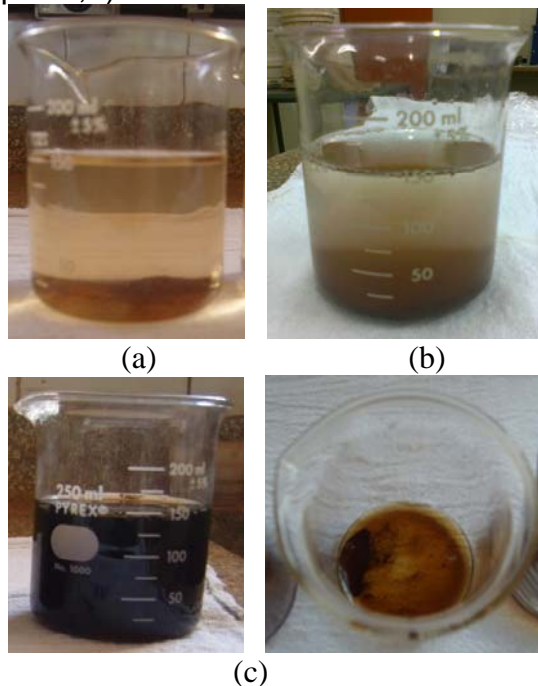
Figura 5.3 – Torrão imerso em um béquer (a) com água (pH=7,2), (b) com hexametáfosfato de sódio (pH=5,7), (c) com uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio (pH=2,4).



Fonte: o próprio autor.

Os torrões imersos em uma mistura de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio (pH=12,0), em uma solução de NaOH 0,001N (pH=13,2), em lixiviado (pH=8,4) foram classificados em grau 3, pois ocorreu uma reação moderada, com turbidez e uma fina camada de partículas no fundo do béquer, como mostram as imagens da Figura 5.4.

Figura 5.4 – Torrão imerso em um béquer (a) com uma mistura de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio (pH=12,0), (b) com uma mistura de ácido fosfórico e hexametáfosfato de sódio (pH=2,4), (c) com lixiviado (pH=8,4).



Fonte: o próprio autor.

5.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

5.4.1 Condutividade Elétrica do Extrato Aquoso

A Tabela 5.4 apresenta os resultados do ensaio de condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo. Este ensaio foi realizado com solo natural e amostras de solo obtidas dos ensaios edométricos inundados, com os diferentes fluidos. Antes dos ensaios as amostras de solo foram secas ao ar livre e destorroadas. Os fluidos de inundação foram: água (pH=7,20, lixiviado (pH=8,4), duas soluções preparada em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

A condutividade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo natural foi obtida com o intuito de confirmar a diferença dos os valores de CE encontrados nas amostras de solo após a inundação dos diversos fluidos.

Os ensaios seguiram os procedimentos propostos por Camargo *et al.* (1986). A constante é da ordem de 0,1 e a escala utilizada é em S/cm (Siemens por centímetro), do condutímetro utilizado para a execução do ensaio de condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo.

Tabela 5.4 – Condutibilidade Elétrica do Extrato Aquoso para o solo no estado natural e com este após os ensaios edométricos inundados com os diferentes fluidos de inundação, amostras de 2,0 m de profundidade do CEEG.

Solo/ Fluido de Inundação	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Solo natural	4,425.10
Solo inundado em Água	3,315.10
Solo inundado em Lixiviado	2,350.10 ³
Solo inundado em solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	1,249.10 ⁶
Solo inundado em solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio	2,000.10 ³

Fonte: do próprio autor

Onde: μS : Microsiemens.

A condutibilidade elétrica permite avaliar a concentração de íons solúveis no solo através da salinidade deste, pois é aproximadamente proporcional à quantidade de sal da solução. Estes íons solúveis na solução de solo conduzem

corrente elétrica. Quanto maior a concentração salina maior será a corrente elétrica conduzida pela solução. Portanto é possível concluir que o solo inundado na solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio obteve a maior concentração de íons solúveis no solo, seguidos do solo inundado em lixiviado e na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio. O solo inundado em água obteve a menor concentração de íons solúveis no solo.

A principal característica do aumento da concentração de sais solúveis no solo é a elevação do seu potencial osmótico (MELO et al., 2001). O aumento da salinidade no solo gera efeitos sobre a estrutura do solo devido à interação eletroquímica entre os cátions e a argila, gerando uma maior degradação dos vínculos cimentícios entre as partículas de solo, com uma consequente compactação do solo e alteração da estrutura do solo (DIAS & BLANCO,2010).

5.4.2 Condutividade Elétrica do Fluido de Inundação

A Tabela 5.5 apresenta os resultados do ensaio de condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação. Este ensaio foi realizado nos fluidos de inundação utilizados nos ensaios edométricos. Os fluidos usados foram: água (pH=7,20, lixiviado (pH=8,4), duas soluções preparada em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

Os ensaios seguiram os procedimentos propostos por Camargo *et al.* (1986). A constante é da ordem de 0,1 e a escala utilizada é em s/cm (Siemens por centímetro), do condutímetro utilizado para a execução do ensaio de condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação.

Tabela 5.5 – Condutibilidade Elétrica dos fluidos de inundação utilizados nos ensaios edométricos.

Solo/ Fluido de Inundação	CE ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)
Água	7,642.10
Lixiviado	4,910.10 ³
Hexametáfosfato de sódio	1,272.10 ⁴
Solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio	1,520.10 ⁴
Solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio	2,310.10 ⁴

Fonte: do próprio autor

Onde: μS : Microsiemens.

Esta constante (CE) mede a facilidade com que uma substância fluida é capaz de interagir com um outro campo elétrico (COLLARES, 2002). Dos ensaios realizados foi possível concluir que as soluções preparadas em laboratório produzem as condutividades elétricas (CE) elevadas, sendo o maior valor encontrado na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio. A água mostrou o menor valor de condutividade elétrica (CE).

A velocidade de umedecimento está diretamente correlacionada com solubilidade (concentração de sais) do fluido que percola no solo, ou seja, esta velocidade está inteiramente correlacionada com a perda de resistência dos vínculos de cimentação do solo. Isso ocorre devido à influência do fluido de inundação na mobilidade dos íons no solo. Esta propriedade é expressa através da condutividade elétrica (CE) dos fluidos de inundação (MOTTA & FERREIRA, 2011).

5.5 ENSAIO EDOMÉTRICO

Como já mencionado no Capítulo 4, para a avaliação do índice de colapso dos solos, foram realizados ensaios edométricos duplos e simples, usando amostras do tipo indeformada. Os fluidos de inundação nos ensaios duplos e simples foram: água, lixiviado, duas soluções preparadas em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

O fenômeno do colapso do solo foi avaliado por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg (Tabela 5.6), e também por critérios baseados em ensaios edométricos (Tabela 5.7). As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os autores dos critérios, as expressões propostas e os critérios considerados para classificar a colapsibilidade.

No Capítulo 4 foram apresentados (Tabela 4.1) os limites de Atterberg (LL= 56,5% e LP= 42,2%) do solo a 2,45 m de profundidade do poço n.º 9, do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG), apresentados por Christoni & Teixeira (2014), e usados como valores padrão para todos os cálculos dos critério baseados nos índices físicos e limites de Atterberg.

O potencial de colapso l_c referente ao ensaio edométrico simples foi calculado segundo a Equação 17, onde, Δe_c = variação do índice de vazios pela inundação e e_i = índice de vazios inicial.

$$I_c = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i} \quad (\text{Equação 17})$$

Tabela 5.6 – Critérios baseados em Índices Físicos e nos Limites de Atterberg.

Autor	Expressão	Critérios Considerados para os solos	Fonte
Prikloński (1952)	$K_d = \frac{LL - w_0}{LL - LP}$	$K_d < 0$ – Solos altamente colapsíveis $K_d \geq 0,5$ – solos não colapsíveis $K_d > 1$ – Solos expansivos	FEDA (1966)
Feda (1966)	$K = \frac{\left(\frac{w_0}{S_0}\right) - LP}{LL - LP}$	Solos com grau de saturação $S_0 < 60\%$ $K > 0,85 \rightarrow$ colapsíveis	FEDA (1966)
Gibbs e Bara (1967)	Figura 2.10	Caso 01: solo propício ao colapso Caso 02: condição limite Caso 03: solo não colapsível	GIBBS & BARA (1967)

Fonte: do próprio autor

Onde: K_d = coeficiente de colapso ou subsistência, LL = Limite de Liquidez, LP = Limite de Plasticidade, W_0 = umidade de campo, K = coeficiente de colapso ou subsistência, S_0 = Grau de Saturação Natural.

Tabela 5.7 – Critérios baseados em ensaios edométricos.

Autor	Expressão	Critérios Considerados para os solos	Fonte
Reginatto & Ferrero (1973)	$C = \frac{\sigma_{cs} - \sigma_0}{\sigma_{cn} - \sigma_0}$	$C < 0$ – verdadeiramente colapsível; $0 < C < 1$ – condicionalmente colapsível; $C = 1$ – não é colapsível; $C = -\infty$ – é colapsível e normalmente adensado;	Reginatto & Ferrero (1973)
Jennings & Knight (1975)	$CP = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0}$	CP (%): 0-1 → Gravidade do problema – Nenhuma CP (%): 1-5 → Gravidade do problema – Moderado CP (%): 5-10 → Gravidade do problema – Problemático CP (%): 10-20 → Gravidade do problema – Grave CP (%) > 20 → Gravidade do problema – Muito Grave	Jennings & Knight (1975)
Vargas (1978)	$i = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$	$i > 0,02 \rightarrow$ Colapsível	Vargas (1978)
Luteneger e Sabber (1988)	$I = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$	I (%) -2 → Gravidade do problema – Leve I (%) -6 → Gravidade do problema – Moderada I (%) -10 → Gravidade do problema – Alta	Luteneger & Sabber (1988)

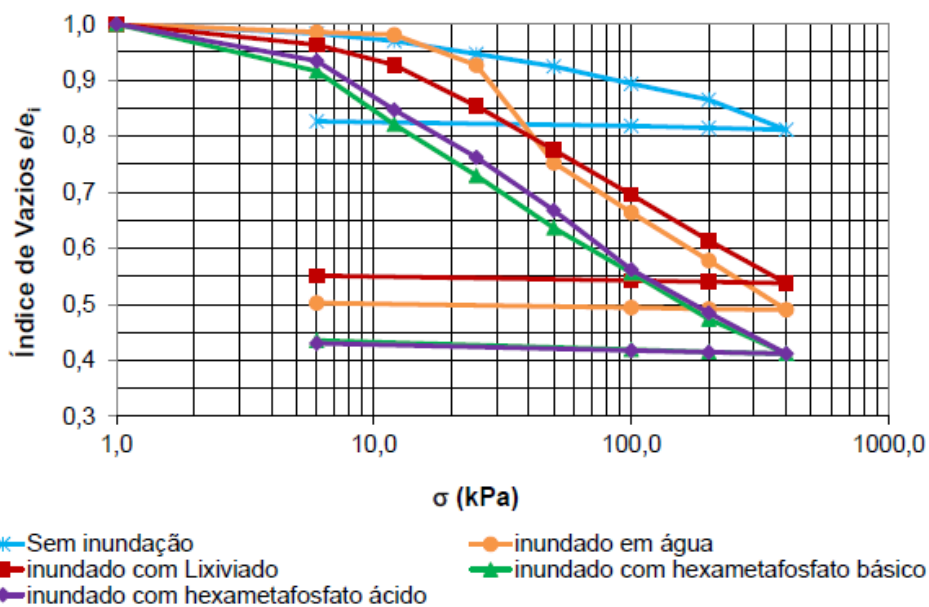
Fonte: do próprio autor

Onde σ_{cs} = tensão de pré-adensamento do solo saturado, σ_{cn} = tensão de pré-adensamento do solo com umidade de campo, σ_0 = tensão vertical geostática, Δe_c = variação do índice de vazios pela inundação, Δe = variação do índice de vazios pela inundação, e_i = índice de vazios inicial. Para o critério de Reginatto & Ferrero (1973) as tensões de pré-adensamento foram determinadas pelo método Pacheco Silva.

5.5.1 Ensaio Edométrico Duplo

O Gráfico 5.1 apresenta as curvas de compressão do solo do CEEG a 2 metros de profundidade obtidas por meio dos ensaios edométricos duplo na umidade de campo e inundado com: água (pH=7,2), lixiviado (pH=8,4) e duas soluções preparada em laboratório (solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12,0; e solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

Gráfico 5.1 – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo.



Fonte: o próprio autor.

O fenômeno do colapso pode ser observado devida à diferença de traçado entre as curvas. Porém em uma análise inicial observa-se que os índices de colapso são maiores nos corpos de prova inundados com as soluções preparadas

em laboratório, seguidas do inundado em lixiviado, e os menores índices de colapso devem ser encontrados no corpo de prova inundado em água.

5.5.1.1 Avaliação do colapso pelos critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg

Foram obtidos os índices físicos do solo antes e após a realização dos ensaios edométricos. Os índices físicos foram calculados com o intuito de verificar se o solo foi completamente saturado após a inundação e se ocorreu   diminui o do  ndice de vazios após os carregamentos, o que ocorreu em todos os ensaios edométrico simples e duplos.

A Tabela 5.8 apresenta os índices físicos obtidos antes e depois dos ensaios edométricos duplos, sendo eles: teor de umidade, massa específica do solo seca,  ndice de vazios e grau de satura o.

Tabela 5.8 –  ndices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos

Corpos de prova	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		�ndice de vazios		Grau de Satura�o (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Umidade de campo	28,29	22,09	0,95	1,08	2,15	1,77	39,55	37,38
Inundado com �gua	28,44	42,48	1,01	1,49	1,98	0,99	43,19	100
Inundado com lixiviado	31,59	38,90	1,25	1,89	2,16	1,19	43,84	97,92
Inundado com hexametafosfato de sódio básico	20,68	30,88	1,10	1,73	1,73	0,75	35,85	100
Inundado com hexametafosfato de sódio �cido	20,66	28,80	1,00	1,70	2,00	0,86	31,05	100

Fonte: do próprio autor

Em todos os ensaios duplos foi constatada a satura o completa dos corpos de prova e a diminui o expressiva nos índices de vazios do solo após o ensaio edométrico duplo.

Com os valores da Tabela 5.8 foram efetuadas as avalia es do colapso, usando os critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Avaliação de colapso usando os critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg dos corpos de prova dos ensaios duplos.

Métodos/ Critérios	Umidade de campo	Inundado com água	Inundado com lixiviado	Inundado com Hexametáfosfato de sódio básico	Inundado com Hexametáfosfato de sódio ácido	
Priklonskij (1952)	Kd	1,97	1,96	1,74	2,50	2,51
	Clas.	Expansivo	Expansivo	Expansivo	Expansivo	Expansivo
	K	-2,90	-2,91	-2,90	-2,91	-2,90
Feda (1966)	Clas.	Não Colapsível	Não Colapsível	Não Colapsível	Não Colapsível	Não Colapsível
	S ₀	39,55%	43,19%	43,84%	35,85%	31,05%
Feda (1966)	Clas.	Colapsível	Colapsível	Colapsível	Colapsível	Colapsível
Gibbs e Bara (1967)	Caso	Caso I	Caso I	Caso I	Caso I	Caso I
	Clas.	Colapsível	Colapsível	Colapsível	Colapsível	Colapsível

Fonte: do próprio autor

Conforme o critério de Priklonski (1952) o Kd calculado foi maior que 1, isto ocorreu para todos os fluidos de inundação utilizados nos ensaios edométricos com inundação inicial. Valores de Kd maiores que 1 classificam o solo como expansivo, porém essa condição não condiz com a realidade observada para o solo da região de Londrina. Portanto, esse critério não é indicado para a avaliação do colapso do solo estudado, pois conduz a um resultado irreal.

No critério de Feda (1966) são realizadas duas avaliações, a primeira considera que os solos parcialmente saturados, com $K > 0,85$ são colapsíveis, concluindo que o solo estudado não é colapsível, uma vez que o K calculado para todos os corpos está em torno de -2,90. A segunda avaliação determina que solos com grau de saturação natural menor do que 60%, quando saturados apresentarão o fenômeno do colapso, o que permite concluir que todos os solos estudados são colapsíveis, uma vez que em todos os corpos de prova a saturação natural foi menor que 60%.

De acordo com o critério de Gibbs e Bara (1967), todos os corpos de prova foram classificados no Caso I, portanto, quando saturado o solo é suscetível ao fenômeno do colapso.

5.5.1.2 Avaliação do colapso pelos critérios baseados em ensaios edométricos duplos

Com os valores dos índices físicos obtidos por meio da realização dos ensaios edométricos duplos (inundados em água, lixiviado e com duas soluções

preparada em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4), foi efetuada a avaliação do colapso por meio de critérios baseados em ensaios de laboratório (Tabela 5.13).

Tabela 5.10 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaio edométricos duplos.

Métodos/ Critérios		Reginatto & Ferrero (1973)
Inundado com água	Coeficiente	-0,13
	Classificação	Verdadeiramente colapsível
Inundado com lixiviado	Coeficiente	-0,25
	Classificação	Verdadeiramente colapsível
Hexametáfosfato de sódio básico	Coeficiente	-0,25
	Classificação	Verdadeiramente colapsível
Hexametáfosfato de sódio ácido	Coeficiente	-0,37
	Classificação	Verdadeiramente colapsível

Fonte: do próprio autor

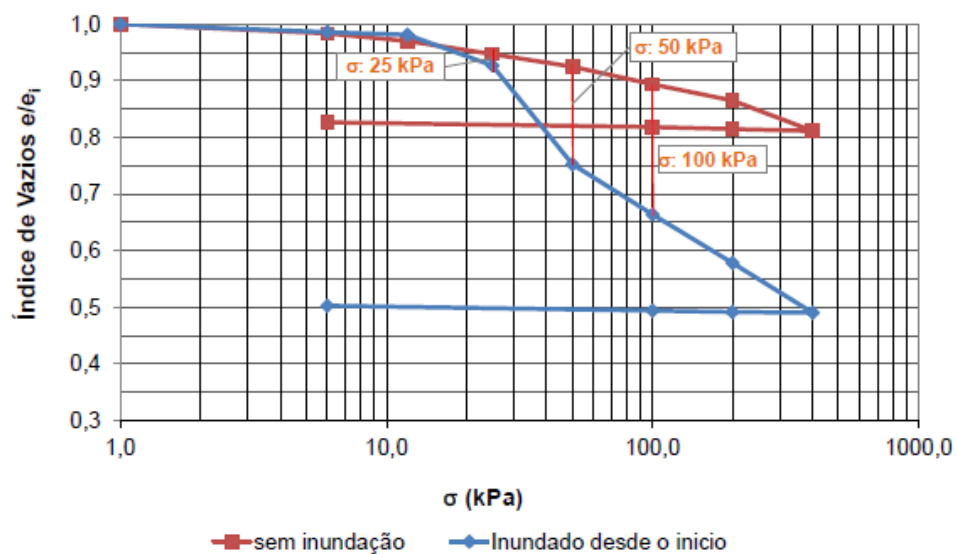
Conforme o critério de Reginatto & Ferrero (1973) o coeficiente de colapsibilidade obtido é menor que 0, classificando o solo como sendo verdadeiramente colapsível. Isto ocorreu para todos os fluidos de inundação utilizados nos ensaios edométricos com inundação inicial.

5.5.1.3 Avaliação preliminar do colapso pelos critérios baseados nas diferenças das curvas dos ensaios edométricos duplos

O fenômeno do colapso pode ser observado, nos ensaios edométricos duplos (Gráficos 5.2 a 5.5), a partir da diferença de traçado entre as curvas dos ensaios com inundação inicial e a curva sem inundação.

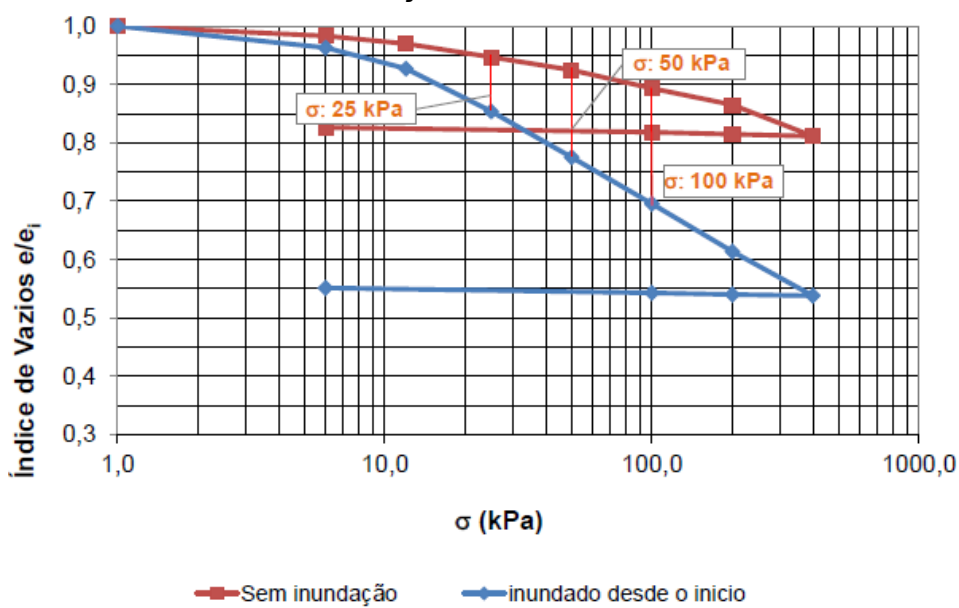
A partir da diferença entre as curvas também foi possível fazer uma estimativa dos índices de colapso que serão encontrados nos ensaios edométricos com inundação nas tensões de interesse de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa (Tabela 5.11).

Gráfico 5.2 – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo – sem e com inundação inicial, usando água.



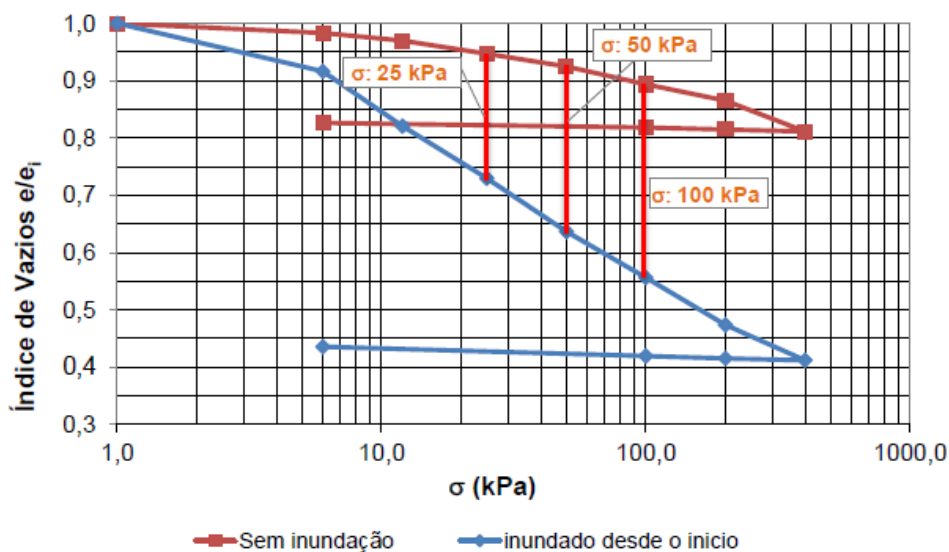
Fonte: o próprio autor.

Gráfico 5.3 – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo – sem e com inundação inicial, usando lixiviado.



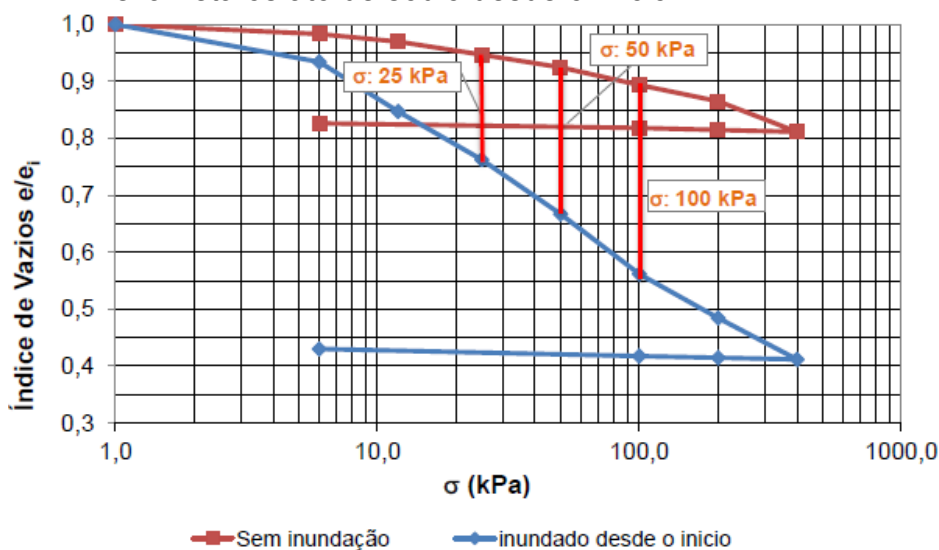
Fonte: o próprio autor.

Gráfico 5.4 – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo – sem e com inundação inicial, usando a mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio desde o início.



Fonte: o próprio autor.

Gráfico 5.5 – Curvas de compressão obtidas no ensaio edométrico duplo – sem e com inundação inicial, usando a mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio desde o início.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 5.11 – Estimativa de colapso com inundação nas tensões de 25, 50 100 kPa por meio de ensaios edométricos.

Critérios		Jennings & Knight (1975)		Vargas (1978)		Lutenneger e Sabber (1988)	
Fluido de inundação	Tensão (kPa)	<i>i</i> (%)	Classificação	<i>i</i> (%)	Classificação	<i>i</i> (%)	Classificação
Água	25	0,7	Não colapsível	0,7	Não colapsível	0,7	Não colapsível
	50	5,8	Potencial Problemático	5,8	Colapsível	5,8	Potencial Leve
	100	7,7	Potencial Problemático	7,7	Colapsível	7,7	Potencial Moderado
Lixiviado	25	2,9	Potencial Moderado	2,9	Colapsível	2,9	Potencial Leve
	50	4,7	Potencial Moderado	4,7	Colapsível	4,7	Potencial Leve
	100	6,3	Potencial Problemático	6,3	Colapsível	6,3	Potencial Moderado
Hexametáfosfato de sódio básico	25	7,9	Potencial Problemático	7,9	Colapsível	7,9	Potencial Alto
	50	10,5	Potencial Grave	10,5	Colapsível	10,5	Potencial Alto
	100	12,3	Potencial Grave	12,3	Colapsível	12,3	Potencial Alto
Hexametáfosfato de sódio ácido	25	6,2	Potencial Problemático	6,2	Colapsível	6,2	Potencial Alto
	50	8,6	Potencial Problemático	8,6	Colapsível	8,6	Potencial Alto
	100	11,0	Potencial Grave	11,0	Colapsível	11,0	Potencial Alto

Fonte: do próprio autor.

Dos resultados estimados para os índices de colapso podemos constatar que para inundação com água a uma tensão de 25 kPa não ocorrerá o colapso do solo.

Em todos os outros fluidos de inundação e tensões aplicadas ocorrerá o fenômeno do colapso do solo. Os maiores valores de índice de colapso ocorrerão nas inundações ocorridas nas duas soluções preparada em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4). Na solução básica os índices de colapso medidos foram os mais expressivos.

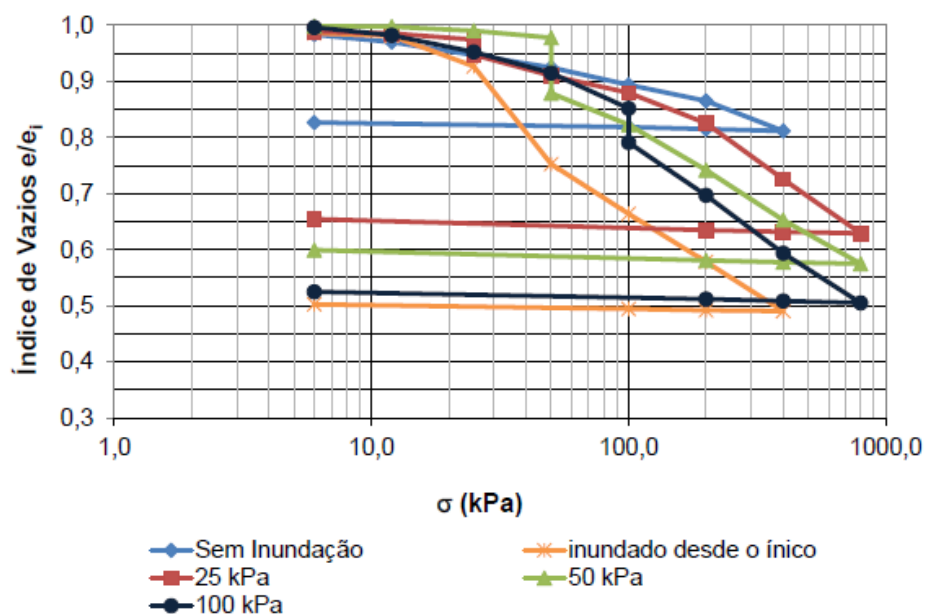
5.5.2 Ensaio Edométrico Simples

Nos ensaios edométricos simples o corpo de prova foi carregado inicialmente no teor de umidade de campo. Este foi solicitado até uma carga de interesse, após este estágio de carregamento e estabilização das deformações do corpo de prova, adicionou-se o fluido de inundação para que houvesse o aumento do grau de saturação. As cargas de interesse, para a inundação dos corpos de prova, foram as de 25, 50 e 100 kPa. Os fluidos de inundação foram à água, o lixiviado, duas soluções preparadas em laboratório (mistura de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12, e mistura de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

5.5.2.1 Ensaio edométrico simples inundado com água

O Gráfico 5.6 mostra as curvas dos ensaios inundados com água (pH=7,2) nas tensões de interesse e as discontinuidades das curvas que comprovam o fenômeno do colapso do solo. O fenômeno do colapso constatado pela descontinuidade da curva foi mais relevante para a tensão de 50 kPa, neste caso.

Gráfico 5.6 – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com água nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa.



Fonte: o próprio autor.

5.5.2.1.1 Avaliação do colapso quando inundado em água pelos critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg.

Dos ensaios edométricos simples foram obtidos os índices físicos do solo antes e após o final da realização desses. Em todos os ensaios edométricos simples inundados com água foram constatadas a saturação completa dos corpos de prova e ocorreu diminuição expressiva nos índices de vazios do solo, após a finalização dos ensaios.

A Tabela 5.12 apresenta os índices físicos obtidos nos ensaios edométricos simples inundados com água, sendo eles: teor de umidade, massa específica do solo seca, índice de vazios e grau de saturação.

Tabela 5.12 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundados com água

Corpos de prova Inundados em Água	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Índice de vazios		Grau de Saturação (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Tensão de 25 kPa	35,89	37,17	1,02	1,33	1,95	1,24	55,27	90,17
Tensão de 50 kPa	31,00	37,07	0,96	1,34	2,13	1,23	43,75	90,10
Tensão de 100 kPa	31,40	38,60	1,00	1,46	1,99	1,02	47,34	100

Fonte: do próprio autor

A avaliação do colapso, por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg está apresentada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova dos ensaios edométricos simples inundado com água.

Métodos/ Critérios		Inundado com água 25 kPa		Inundado com água 50 kPa		Inundado com água 100 kPa	
		Coef.	Classificação	Coef.	Classificação	Coef.	Classificação
Priklonskij (1952)	Kd	1,44	Expansivo	1,78	Expansivo	1,75	Expansivo
Feda (1966)	K	-2,90	Não Colapsível	-2,90	Não Colapsível	-2,90	Não Colapsível
Feda (1966)	S ₀	55,27	Colapsível	43,75	Colapsível	47,34	Colapsível
Gibbs e Bara (1967)		Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível

Fonte: do próprio autor.

Onde: Coef.: Coeficiente.

Conforme o critério de Priklonski (1962), onde o Kd calculado foi maior que 1, classifica o solo como expansivo. Porém essa condição não condiz com a realidade observada para o solo da região de Londrina. Portanto, esse critério não

é indicado para a avaliação do colapso do solo estudado, pois conduz a um resultado irreal.

No critério de Feda (1966) são realizadas duas avaliações, a primeira considera que os solos parcialmente saturados, com $K > 0,85$ são colapsíveis, concluindo que o solo estudado não é colapsível para este critério, uma vez que o K calculado para todos os corpos está em torno de $-2,90$. A segunda avaliação determina que solos com grau de saturação natural menor do que 60%, quando saturados apresentarão o fenômeno do colapso, sendo assim nesta avaliação o solo é colapsível.

De acordo com o critério de Gibbs e Bara (1967), todos os corpos de prova foram classificados como sendo Caso I, portanto, quando saturado o solo é suscetível ao fenômeno do colapso.

5.5.2.1.2 *Avaliação do colapso quando inundado com água usando critérios baseados nos ensaios edométricos simples.*

A partir das descontinuidades apresentadas nas curvas do Gráfico 5.6 foi possível quantificar e classificar o fenômeno do colapso do solo. A Tabela 5.14 apresentada a avaliação do colapso por meio de critérios baseados nos ensaios edométricos simples quando inundados com água, nas tensões de interesse. O comportamento colapsível do solo, neste caso, também foi confirmado.

Tabela 5.14 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em de ensaios edométricos simples inundado com água.

Métodos/ Critérios	Inundado com água 25 kPa		Inundado com água 50 kPa		Inundado com água 100 kPa	
	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação
Jennings & Knight (1975)	1,8	Potencial moderado	6,7	Potencial Problemático	4,0	Potencial moderado
Vargas (1978)	1,8	Colapsível	6,7	Colapsível	4,0	Colapsível
Lutenneger e Sabber (1988)	1,8	Potencial Leve	6,7	Potencial Alto	4,0	Potencial moderado

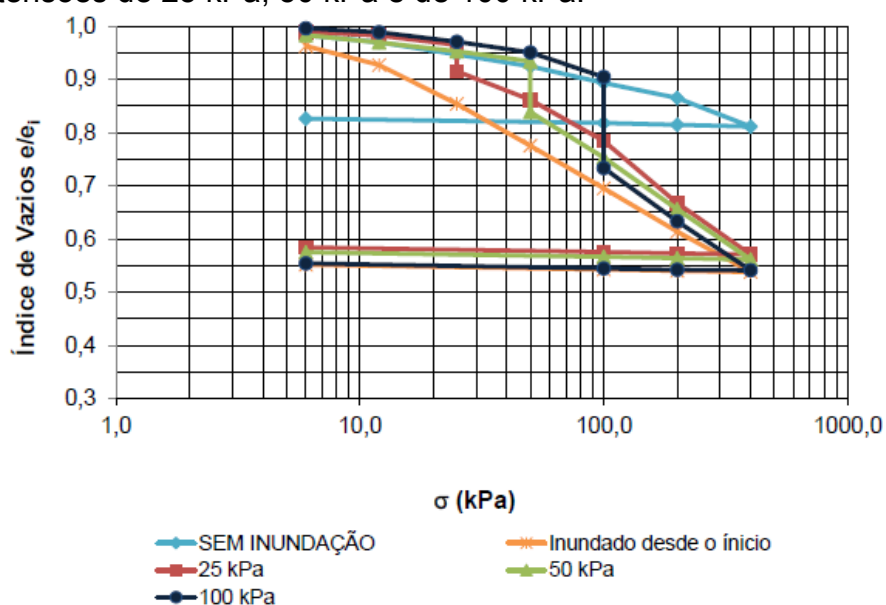
Fonte: do próprio autor.

Segundo a Tabela 5.15, em todas as tensões de inundação e para todos os critérios usados, o solo foi classificado como colapsível.

5.5.2.2 Ensaio edométrico simples inundado com lixiviado

O Gráfico 5.7 apresenta as curvas de compressão dos ensaios edométricos simples com inundação em lixiviado (pH=8,4) nas tensões de interesse 25, 50 e 100 kPa. A descontinuidade da curva nas tensões de interesse comprovam o fenômeno do colapso no solo.

Gráfico 5.7 – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com lixiviado nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa.



Fonte: o próprio autor.

Esse fenômeno também foi constatado por Rodrigues (2003), Faria *et al.* (2003), Garcia *et al.* (2004), Rodrigues & Lollo (2007) e Rodrigues *et al.* (2010). A descontinuidade mais relevante ocorreu na curva de inundação na tensão de 100 kPa para solo estudado.

5.5.2.2.1 Avaliação do colapso quando inundado com lixiviado pelos cr terios baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg.

Através dos ensaios edométricos simples foram obtidos os índices físicos do solo antes e após a realização dos ensaios. Em todos os ensaios edométricos simples inundados em lixiviado foi constatada a saturação completa dos

corpos de prova e ocorreu diminuição expressiva nos índices de vazios do solo após o ensaio.

A Tabela 5.15 apresenta os índices físicos obtidos nos ensaios edométricos simples inundados com lixiviado, sendo eles: teor de umidade, massa específica do solo seca, índice de vazios e grau de saturação.

Tabela 5.15 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com lixiviado

Corpos de prova Inundados em Lixiviado	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Índice de vazios		Grau de Saturação (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Tensão de 25 kPa	30,91	37,60	1,04	1,40	1,88	1,10	49,36	100
Tensão de 50 kPa	29,49	38,88	1,11	1,49	1,69	0,97	52,21	100
Tensão de 100 kPa	32,07	40,48	1,03	1,45	1,92	1,06	50,07	100

Fonte: do próprio autor

A avaliação do colapso, por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg está apresentada na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado com Lixiviado em ensaios edométricos simples.

Métodos/ Critérios		Inundado com lixiviado 25 kPa		Inundado com lixiviado 50 kPa		Inundado com lixiviado 100 kPa	
		Coef.	Classificação	Coef.	Classificação	Coef.	Classificação
Prikloński (1952)	Kd	1,80	Expansivo	1,90	Expansivo	1,70	Expansivo
Feda (1966)	K	-2,91	Não Colapsível	-2,91	Não Colapsível	-2,91	Não Colapsível
Feda (1966)	S ₀	49,36	Colapsível	52,21	Colapsível	50,07	Colapsível
Gibbs e Bara (1967)		Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível

Fonte: do próprio autor.

Onde: Coef.: Coeficiente.

Conforme o critério de Prikloński (1952) o Kd calculado foi maior que 1, o que significa que o solo é classificado como expansivo. Porém essa condição não condiz com a realidade observada para o solo da região de Londrina. Por isso, esse critério não é indicado para a avaliação do colapso do solo estudado, pois conduz a um resultado irreal.

No critério de Feda (1966) são realizadas duas avaliações, a primeira considera que os solos parcialmente saturados, com $K > 0,85$ são

colapsíveis, concluindo que o solo estudado não é colapsível para este critério, uma vez que o K calculado para todos os corpos está em torno de -2,91. A segunda avaliação determina que solos com grau de saturação natural menor do que 60%, quando saturados apresentarão o fenômeno do colapso, sendo assim nesta avaliação o solo é colapsível.

De acordo com o critério de Gibbs e Bara (1967), todos os corpos de prova foram classificados como sendo Caso I, portanto, quando saturado o solo é suscetível ao fenômeno do colapso.

5.5.2.2.2 Avaliação do colapso quando inundado com lixiviado pelos critérios baseados nos ensaios edométricos simples.

A partir das discontinuidades apresentadas nas curvas do Gráfico 5.7 foi avaliado e classificado o fenômeno do colapso do solo. A Tabela 5.17 apresentada a avaliação do colapso baseada nos resultados dos ensaios edométricos simples, quando inundado com lixiviado, nas tensões escolhidas.

Tabela 5.17 – Avaliação de colapso usando os critérios baseados em ensaios edométricos simples inundado com lixiviado.

Métodos/ Critérios	Inundado com lixiviado 25 kPa		Inundado com lixiviado 50 kPa		Inundado com lixiviado 100 kPa	
	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação
Jennings & Knight (1975)	3,20	Potencial moderado	5,10	Potencial Problemático	11,00	Potencial Grave
Vargas (1978)	3,20	Colapsível	5,10	Colapsível	11,00	Colapsível
Luteneger e Sabber (1988)	3,20	Potencial moderado	5,10	Potencial moderado	11,00	Potencial Alto

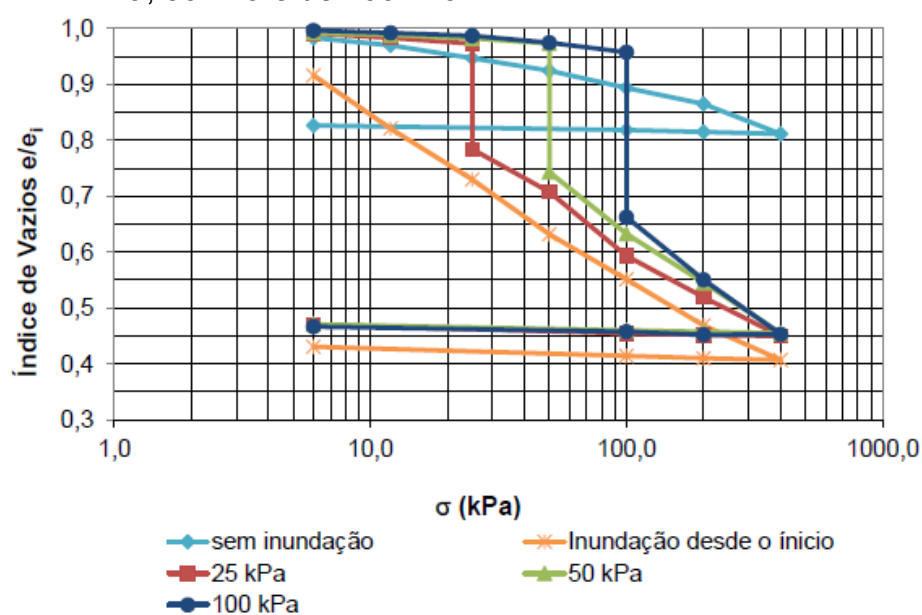
Fonte: do próprio autor.

O comportamento colapsível do solo, neste caso, também foi confirmado para todas as tensões de inundação.

5.5.2.3 Ensaio edométrico simples inundado com solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio

O Gráfico 5.8 apresenta as curvas dos ensaios com inundação usando a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12), nas tensões de interesse, 25, 50 e 100 kPa.

Gráfico 5.8 – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa.



Fonte: o próprio autor.

As descontinuidades das curvas comprovam o fenômeno do colapso do solo. Este fenômeno também foi constatado por Collares (2002) para a mesma solução nos solos avaliados por esta autora.

5.5.2.3.1 Avaliação do colapso quando inundado com solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio usando os critérios dos índices físicos e dos limites de Atteberg.

Dos ensaios edométricos simples foram obtidos os índices físicos do solo antes e após a realização dos ensaios de laboratório. Em todos os ensaios edométricos simples, inundados com a solução de hidróxido de sódio com

hexametáfosfato de sódio, foram constatadas a saturação completa dos corpos de prova e ocorreu diminuição expressiva nos índices de vazios do solo após os ensaios.

A Tabela 5.18 apresenta os índices físicos obtidos nos ensaios, sendo eles: teor de umidade, massa específica do solo seca, índice de vazios e grau de saturação.

Tabela 5.18 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio

Corpos de prova inundado com hexametáfosfato básico	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Índice de vazios		Grau de Saturação (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Tensão de 25 kPa	18,14	34,23	1,02	1,55	1,93	0,91	29,20	100
Tensão de 50 kPa	20,24	32,75	1,03	1,66	1,91	0,90	31,70	100
Tensão de 100 kPa	20,82	31,22	1,00	1,57	2,00	0,93	31,30	100

Fonte: do próprio autor

A avaliação do colapso, por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg está apresentada na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio em ensaios edométricos simples.

Métodos/ Critérios		Inundado com hexametáfosfato básico 25 kPa		Inundado com hexametáfosfato básico 50 kPa		Inundado com hexametáfosfato básico 100 kPa	
		Coef.	Classificação	Coef.	Classificação	Coef.	Classificação
Prikloński (1952)	Kd	2,70	Expansivo	2,50	Expansivo	2,50	Expansivo
Feda (1966)	K	-2,91	Não Colapsível	-2,91	Não Colapsível	-2,90	Não Colapsível
Feda (1966)	S ₀	29,2%	Colapsível	31,7%	Colapsível	31,3%	Colapsível
Gibbs e Bara (1967)		Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível

Fonte: do próprio autor.

Onde: Coef.: Coeficiente.

Conforme o critério de Prikloński (1952) o Kd calculado foi maior que 1, o que significa que o solo é classificado como expansivo, porém essa condição não condiz com a realidade observada para o solo da região de Londrina. Esse critério não é indicado para a avaliação do colapso do solo estudado, pois conduz a um resultado irreal.

No critério de Feda (1966) são realizadas duas avaliações, a primeira considera que os solos parcialmente saturados, com $K > 0,85$ são colapsíveis, concluindo que o solo estudado não é colapsível para este critério, uma vez que o K calculado para todos os corpos está em torno de $-2,91$. A segunda avaliação determina que solos com grau de saturação natural menor do que 60%, quando saturados apresentarão o fenômeno do colapso, sendo assim nesta avaliação o solo é colapsível.

De acordo com o critério de Gibbs e Bara (1967), todos os corpos de prova foram classificados como sendo Caso I, portanto, quando saturado o solo é suscetível ao fenômeno do colapso.

5.5.2.3.2 Avaliação do colapso quando inundado com solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio pelos critérios baseados em ensaios edométricos simples

Das discontinuidades apresentadas nas curvas do Gráfico 5.8 foi possível quantificar e classificar o fenômeno do colapso do solo. A Tabela 5.20 apresentada a avaliação do colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples quando inundados com uma solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio em cargas previamente determinadas.

Tabela 5.20 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples inundados com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio.

Métodos/ Critérios	Inundado com hexametáfosfato básico 25 kPa		Inundado com hexametáfosfato básico 50 kPa		Inundado com hexametáfosfato básico 100 kPa	
	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação
Jennings & Knight (1975)	12,4	Potencial grave	15,2	Potencial grave	19,6	Potencial Grave
Vargas (1978)	12,4	Colapsível	15,2	Colapsível	19,6	Colapsível
Lutenegger e Sabber (1988)	12,4	Potencial alto	15,2	Potencial alto	19,6	Potencial Alto

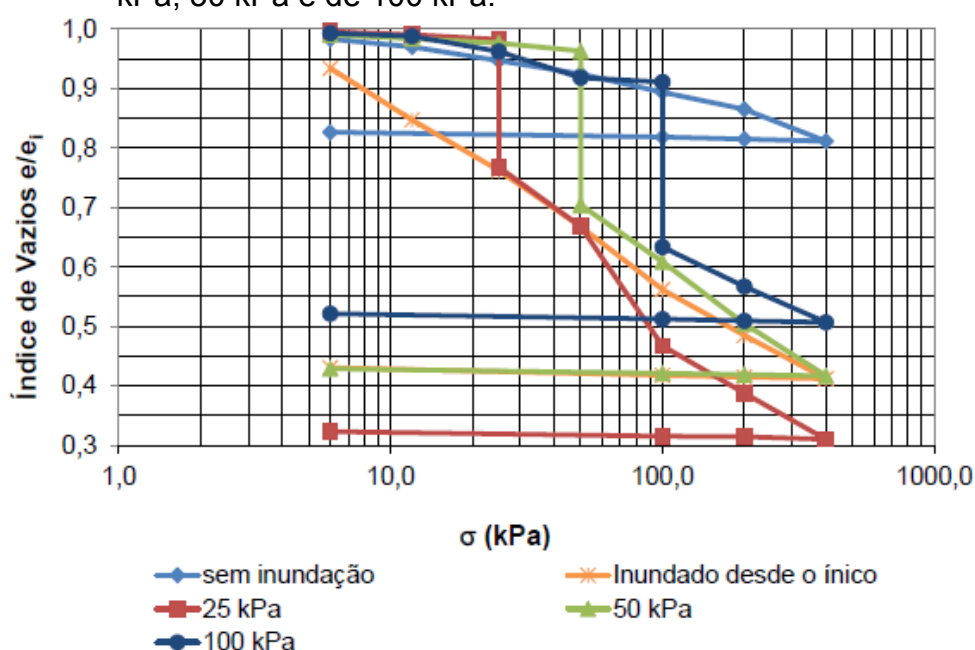
Fonte: do próprio autor.

O comportamento colapsível do solo, neste caso, também foi confirmado, como visto na Tabela 5.20.

5.5.2.4 Ensaio edométrico simples inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio

O Gráfico 5.5 apresenta as curvas dos ensaios inundados com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) nas tensões de interesse 25, 50 e 100 kPa.

Gráfico 5.9 – Curvas de compressão obtidas quando inundadas com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio nas tensões de 25 kPa, 50 kPa e de 100 kPa.



Fonte: o próprio autor.

As descontinuidades das curvas comprovam o fenômeno do colapso do solo. Este fenômeno também foi constatado por Collares (2002) para esta solução no estudo desta autora.

5.5.2.4.1 Avaliação do colapso quando inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio pelos critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atteberg.

Dos ensaios edométricos simples foram obtidos os índices físicos do solo antes e após a realização dos ensaios. Em todos os ensaios edométricos

simples foi constatada a saturação completa dos corpos de prova e ocorreu diminuição expressiva nos índices de vazios do solo após os ensaios edométricos.

A Tabela 5.21 apresenta os índices físicos obtidos nos ensaios edométricos simples inundados, sendo eles: teor de umidade, massa específica do solo seca, índice de vazios e grau de saturação.

Tabela 5.21 – Índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio

Corpos de prova inundado em hexametáfosfato ácido	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Índice de vazios		Grau de Saturação (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Tensão de 25 kPa	20,95	33,83	1,00	1,84	2,00	0,64	31,49	100
Tensão de 50 kPa	20,13	34,60	0,99	1,64	2,03	0,87	29,75	100
Tensão de 100 kPa	32,07	40,48	1,03	1,45	1,92	1,06	50,07	100

Fonte: do próprio autor

A avaliação do colapso, por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg está apresentada na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em índices físicos dos corpos de prova inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio em ensaios edométricos simples.

Métodos/ Critérios		Inundado com hexametáfosfato ácido 25 kPa		Inundado com hexametáfosfato ácido 50 kPa		Inundado com hexametáfosfato ácido 100 kPa	
		Coef.	Classificação	Coef.	Classificação	Coef.	Classificação
Priklonskij (1952)	Kd	2,50	Expansivo	2,50	Expansivo	2,02	Expansivo
Feda (1966)	K	-2,90	Não Colapsível	-2,90	Não Colapsível	-2,91	Não Colapsível
Feda (1966)	S ₀	31,5%	Colapsível	29,8%	Colapsível	42,1%	Colapsível
Gibbs e Bara (1967)		Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível	Caso I	Colapsível

Fonte: do próprio autor.

Onde: Coef.: Coeficiente.

Conforme o critério de Priklonski (1952) o Kd calculado foi maior que 1, o que significa que o solo é classificado como expansivo, porém essa condição não condiz com a realidade observada para o solo da região de Londrina. Esse critério não é indicado para a avaliação do colapso do solo estudado, pois conduz a um resultado irreal.

No critério de Fedá (1966) foram realizadas duas avaliações, a primeira considera que os solos parcialmente saturados, com $K > 0,85$ são colapsíveis, concluindo que o solo estudado não é colapsível para este critério, uma vez que o K calculado para todos os corpos está em torno de $-2,90$. A segunda avaliação determina que solos com grau de saturação natural menor do que 60%, quando saturados apresentarão o fenômeno do colapso, sendo assim nesta avaliação o solo estudado é colapsível.

De acordo com o critério de Gibbs e Bara (1967), todos os corpos de prova foram classificados como sendo Caso I, portanto, quando saturado o solo é suscetível ao fenômeno do colapso.

5.5.2.4.2 *Avaliação do colapso quando inundado com solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio pelos critérios baseados em ensaios edométricos simples*

Das discontinuidades apresentadas nas curvas do Gráfico 5.9 foi possível quantificar e classificar o fenômeno do colapso do solo. A Tabela 5.23 apresenta a avaliação do colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples, quando inundados com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio, em cargas previamente determinadas.

Tabela 5.23 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados em ensaios edométricos simples inundado com uma mistura de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio.

Métodos/ Critérios	Inundado com hexametáfosfato ácido 25 kPa		Inundado com hexametáfosfato ácido 50 kPa		Inundado com hexametáfosfato ácido 100 kPa	
	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação	i (%)	Classificação
Jennings & Knight (1975)	14,3	Potencial grave	17,3	Potencial grave	18,4	Potencial Grave
Vargas (1978)	14,3	Colapsível	17,3	Colapsível	18,4	Colapsível
Lutenneger e Sabber (1988)	14,3	Potencial alto	17,3	Potencial alto	18,4	Potencial Alto

Fonte: do próprio autor.

O comportamento colapsível do solo, neste caso, também foi confirmado por meio destes critérios.

5.5.2.5 Resumo da Avaliação do Colapso para os Ensaio Edométricos Simples

A Tabela 5.24 apresenta um quadro geral dos índices físicos dos corpos de prova obtidos antes e depois dos ensaios edométricos simples. A Tabela 5.25 apresenta um quadro geral da avaliação do colapso por meio de critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg e a Tabela 5.24 apresenta outro quadro geral das avaliações de colapso segundo os critérios baseados em ensaios edométricos. Ambas as tabelas se referem aos resultados baseados nos ensaios edométricos simples.

De um modo geral a avaliação do colapso realizada usando os índices físicos e os limites de Atterberg classificou o solo como colapsível, quando avaliado pelo critério de Gibbs e Bara e como expansivo pelo critério de Prikonskij, sendo esse último não aconselhável para a realização de tal avaliação. O critério de Fedá apresentou duas análises, sendo a primeira o solo considerado não colapsível e a segunda colapsível.

O comportamento colapsível do solo foi confirmado para todos os ensaios edométricos simples realizados, segundo os critérios de avaliação do potencial de colapso.

Os menores potenciais de colapso ocorreram no solo quando inundado em água (pH=7,2). Já os maiores potenciais de colapso ocorreram no solo quando inundado nas soluções preparadas em laboratório (hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12 e ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

Em geral a magnitude do colapso aumenta conforme as tensões aplicadas no solo se elevam (POPESCU, 1986; LAWTON *et al.*, 1992; CINTRA, 1998). Nos ensaios edométricos simples realizados para as tensões de 25, 50 e 100 kPa esta tendência pode ser observada para os ensaios realizados com a inundação usando o lixiviado e nas duas soluções preparadas em laboratório. Esta análise foi realizada entre os valores obtidos para um mesmo fluido de inundação.

Para os ensaios edométricos simples com inundação em água o valor do potencial de colapso foi maior para a tensão de inundação de 50 kPa. Isto ocorreu devido ao fato de quanto maior o índice de vazios maior o potencial de colapso (GUTIERREZ, 2005), e neste conjunto de ensaios o valor do índice de

vazios é mais elevado nesta tensão. Outros fatores podem ter contribuído para a elevação do potencial de colapso nesta tensão como: o teor de umidade, a massa específica seca e o grau de saturação iniciais, que foram inferiores aos valores encontrados na tensão de 100 kPa, para estes índices físicos, antes do ensaio.

O teor de umidade e o grau de saturação inicial tende a interferir na magnitude do colapso do solo, como mostram os estudos realizados por Popescu (1986) e Lawton *et al.* (1992). Estes estudos mostram que o aumento do teor de umidade dos corpos de prova, antes dos ensaios, provoca uma diminuição no valor do potencial de colapso ($I\%$). Os autores observaram que o peso específico aparente seco inicial também é inversamente proporcional ao potencial de colapso ($I\%$), ou seja, quando o valor do peso específico seco aumenta o potencial de colapso ($I\%$) diminui.

Os maiores valores de potencial de colapso ($I\%$) foram obtidos para os corpos de prova quando inundados na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4). Porém na tensão de 100 kPa o maior potencial de colapso ($I\%$) ocorreu no corpo de prova quando inundado na solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12,0). Diversos fatores contribuíram para a elevação na magnitude do colapso, sendo eles: maior índice de vazios inicial, menor teor de umidade inicial, menor massa específica seca inicial e menor grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova que foi inundado na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 100 kPa.

Os menores valores de potencial de colapso ($I\%$) foram encontrados nos corpos de prova inundados em água (pH=7,2). Porém na tensão de 50 kPa o menor potencial de colapso ($I\%$) ocorreu no corpo de prova quando inundado em lixiviado (pH=8,4). Também neste caso, diversos fatores contribuíram para a diminuição na magnitude do colapso, sendo eles: menor índice de vazios inicial, maior massa específica seca inicial e maior grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova que foi inundado com água (pH=7,2) na tensão de 50 kPa.

O solo do Campo Experimental de Engenharia e Geotécnica (CEEG) a 2 metros de profundidade foi classificado como colapsível segundo os critérios baseados em índices físicos, nos limites de Atterberg e nos ensaios edométricos

simples. Os critérios considerados como mais aptos para avaliação do solo estudado foram: de Gibbs e Bara e o de Lutenegeger e Sabber, respectivamente.

Tabela 5.24 – Resumo geral dos índices físicos dos corpos de prova obtidas antes e depois dos ensaios edométricos simples.

Fluido de inundação	Critérios Tensão (kPa)	Teor de Umidade (%)		Massa específica seca (g/cm ³)		Índice de Vaz	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	
Água	25	35,89	37,17	1,02	1,33	1,95	
	50	31,00	37,07	0,96	1,34	2,13	
	100	31,40	38,60	1,00	1,46	1,99	
Lixiviado	25	30,91	37,60	1,04	1,40	1,88	
	50	29,49	38,88	1,11	1,49	1,69	
	100	32,07	40,48	1,03	1,45	1,92	
Hexametáfosfato de sódio básico	25	18,14	34,23	1,02	1,55	1,93	
	50	20,24	32,75	1,03	1,66	1,91	
	100	20,82	31,22	1,00	1,57	2,00	
Hexametáfosfato de sódio ácido	25	20,95	33,83	1,00	1,84	2,00	
	50	20,13	34,60	0,99	1,64	2,03	
	100	32,07	40,48	1,03	1,45	1,92	

Fonte: do próprio autor.

Tabela 5.25 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados nos índices físicos e nos limites de Atterberg.

Fluido de inundação	Critérios Tensão (kPa)	Priklonskij (1952)		Feda (1966)		Feda (1966)	
		C	Classificação	C	Classificação	S ₀ (%)	Classif
Água	25	1,44	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	55,27	Colap
	50	1,78	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	43,75	Colap
	100	1,75	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	47,34	Colap
Lixiviado	25	1,80	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	49,36	Colap
	50	1,90	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	52,21	Colap

Hexametáfosfato de sódio básico	100	1,70	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	50,07	Colap
	25	2,70	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	29,18	Colap
	50	2,50	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	31,72	Colap
	100	2,50	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	31,30	Colap
	25	2,50	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	31,49	Colap
Hexametáfosfato de sódio ácido	50	2,50	Expansivo	-2,90	Não Colapsível	29,75	Colap
	100	2,02	Expansivo	-2,91	Não Colapsível	42,11	Colap

Fonte: do próprio autor.

Onde: C= coeficiente

Tabela 5.26 – Avaliação de colapso por meio de critérios baseados nos ensaios edométricos simples.

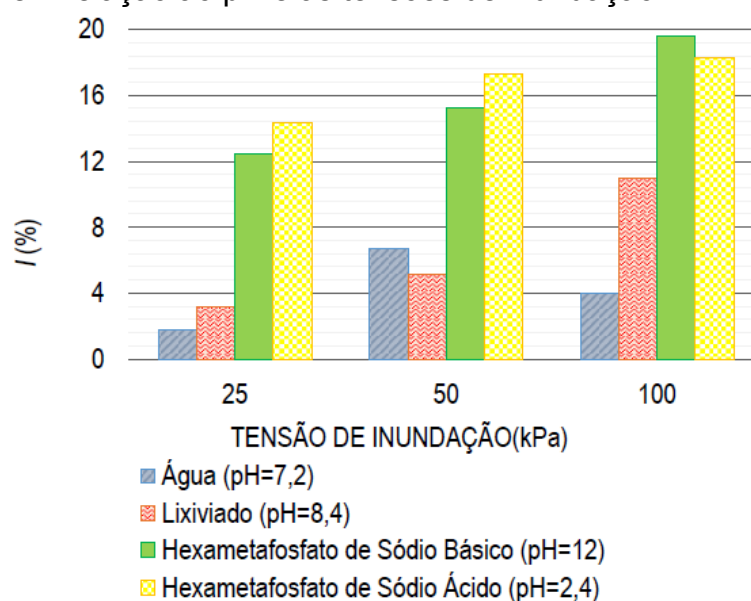
Critérios		Jennings & Knight (1975)		Vargas (1978)	
Fluido de inundação	Tensão (kPa)	<i>i</i> (%)	Classificação	<i>i</i> (%)	Classificação
Água	25	1,8	Potencial Moderado	1,8	Colapsível
	50	6,7	Potencial Problemático	6,7	Colapsível
	100	4,0	Potencial Moderado	4,0	Colapsível
Lixiviado	25	3,20	Potencial Moderado	3,20	Colapsível
	50	5,10	Potencial Problemático	5,10	Colapsível
	100	11,00	Potencial Grave	11,00	Colapsível
Hexametáfosfato de sódio básico	25	12,40	Potencial Grave	12,40	Colapsível
	50	15,20	Potencial Grave	15,20	Colapsível
	100	19,60	Potencial Grave	19,60	Colapsível
Hexametáfosfato de sódio ácido	25	14,30	Potencial Grave	14,30	Colapsível
	50	17,30	Potencial Grave	17,30	Colapsível
	100	18,30	Potencial Grave	18,30	Colapsível

Fonte: do próprio autor.

5.5.3 Avaliação do Potencial do Colapso em Função do pH do Fluido de Inundação

O Gráfico 5.10 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao pH e as tensões de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos resultados dos ensaios edométricos simples, quando inundados com fluidos diferentes nas tensões de 25, 50 e 100 kPa.

Gráfico 5.10 – Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao pH e as tensões de inundação.



Fonte: o próprio autor.

Segundo o Gráfico 5.10 o potencial de colapso (i %) não apresenta uma correlação única com o pH das soluções distintas. Existe uma tendência entre o aumento do pH das soluções orgânicas (água e lixiviado) e a elevação do potencial de colapso (i %). Camapum (1987), Rodrigues (2003), Motta & Ferreira (2011), Rodrigues e Vilar (2012) e Conciani & Barbosa (2013) observaram que com o aumento do pH de soluções orgânicas, o potencial de colapso tende a aumentar.

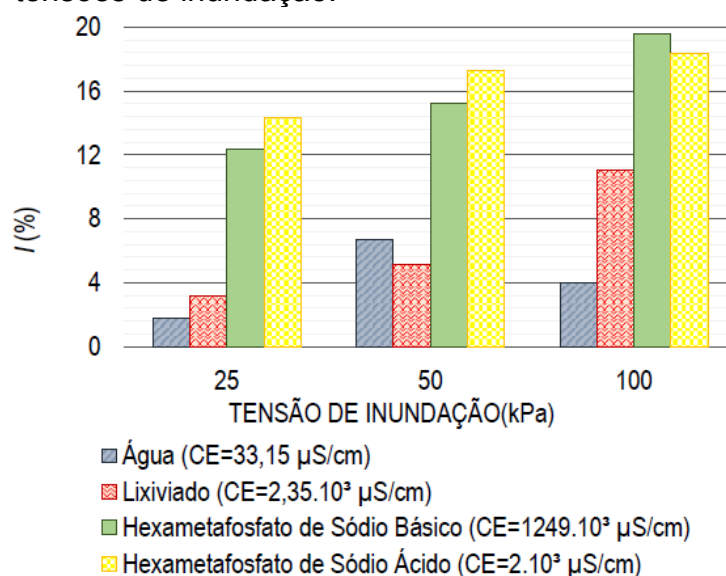
Porém para as soluções preparadas em laboratório utilizando como base o Hexametáfosfato de sódio com pH=12 e pH=2,4 não apresentaram diferença significativa no potencial de colapso (i %). A diferença do potencial de colapso foi de: 1,9% para a tensão de 25 kPa e tensão de 50 kPa (sendo maior para a inundação com a solução de hexametáfosfato de sódio ácido), 1,3% para a tensão de 100 kPa

(sendo maior para a inundação com a solução de hexametáfosfato de sódio básico). Esse comportamento também foi observado por Collares (2002).

5.5.4 Avaliação do Potencial do Colapso em Função da Condutibilidade Elétrica do Extrato Aquoso do Solo

O Gráfico 5.11 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) e o extrato aquoso do solo e as tensões de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples quando inundados com fluidos de interesse nas tensões de 25, 50 e 100 kPa.

Gráfico 5.11 – Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso e as tensões de inundação.



Fonte: o próprio autor.

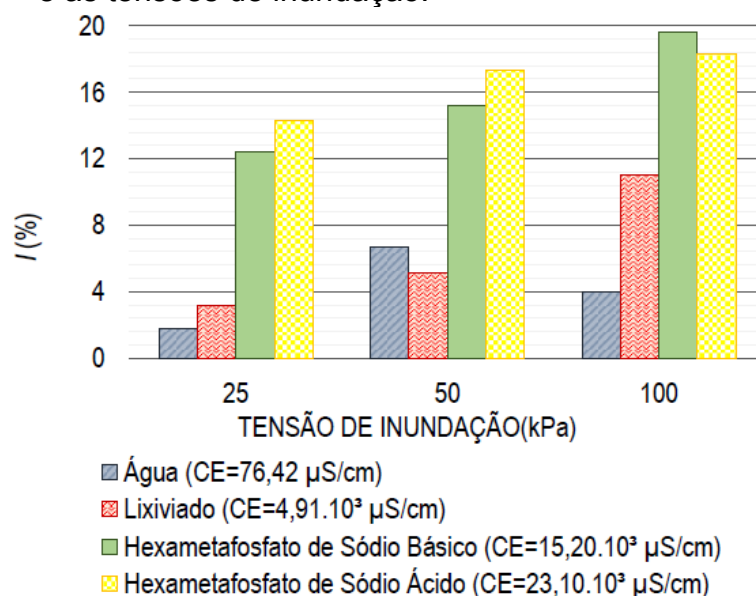
Este Gráfico mostra que o fenômeno do colapso, indicado pelo potencial de colapso (i %), não apresenta uma correlação única com a condutibilidade elétrica do extrato aquoso do solo inundado em fluidos diversos. Existe uma tendência entre o aumento da condutibilidade elétrica e um crescimento no potencial de colapso (i %) quando se observa os valores obtidos para a água e o lixiviado, fluidos orgânicos.

As soluções preparadas em laboratório utilizando como base o Hexametáfosfato de sódio com pH=12 e pH=2,4 mostram os maiores índices de colapso (i %) e não apresentaram diferença significativa neste valor. Porém é possível estabelecer uma correlação direta entre a condutibilidade elétrica do extrato aquoso do solos, inundados com as soluções preparadas em laboratório, e o pH dos fluidos de inundação, quanto maior o pH maior o valor da condutibilidade elétrica (CE).

5.5.5 Avaliação do Potencial do Colapso em Função da Condutibilidade Elétrica do Fluido de Inundação

O Gráfico 5.12 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) fluido de inundação e as tensões de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples quando inundados com fluidos de interesse nas tensões de 25, 50 e 100 kPa.

Gráfico 5.12 – Potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação e as tensões de inundação.



Fonte: o próprio autor.

Este Gráfico mostra que o fenômeno do colapso, indicado pelo potencial de colapso (i %), apresenta uma correlação única com a condutibilidade

elétrica (CE) do fluido de inundação. Existe uma tendência entre o aumento da condutibilidade elétrica (CE) e um crescimento no potencial de colapso (i %). Motta & Ferreira, (2011), Collares (2002) e Mariz & Casanova (1994) observaram também este comportamento no solo argiloso e arenoso do estado de São Paulo, e da cidade de Brasília, respectivamente.

Conforme Mariz & Casanova (1994) a velocidade de umedecimento está diretamente correlacionada com constante dielétrica (condutibilidade elétrica), uma vez que quanto maior for a constante maior será a velocidade de umedecimento, e conseqüentemente as bolhas de ar presentes nos poros do solo serão expulsas mais rapidamente, o que gera uma maior destruição dos vínculos cimentícios entre as partículas de solo.

6 AVALIAÇÃO DO EFEITO DO FLUIDO DE INUNDAÇÃO NO FENÔMENO DO COLAPSO DO SOLO

O solo do CEEG coletado a 2 metros de profundidade, de um modo geral, apresentou índice de vazios elevado, não saturado e massa específica seca de aproximadamente $1,10 \text{ g/cm}^3$. A análise química do solo natural indicou pH de 4,6, classificando o solo quimicamente como ácido. A CTC medida foi de $6,84 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, valor expressamente baixo e característico de solos tropicais. O teor de matéria orgânica foi de $6,62 \text{ g.kg}^{-1}$. Estes valores são comumente encontrados em solos lateríticos e tropicais.

A análise química dos solos inundados nos fluidos de interesse após os ensaios edométricos apresentaram alterações nas suas composições químicas. As amostras que apresentaram as maiores alterações foram as dos solos inundados com os fluidos preparados em laboratório e isso pode ter ocorrido devido à grande presença de fósforo nestes fluidos.

Os maiores índices de colapso também foram observados após a inundação com esses fluidos, portanto, as alterações químicas ocorridas no solo devido à interação entre o solo e o fluido de inundação influenciaram no potencial de colapso.

A análise de DRX mostrou os principais constituintes mineralógicos do solo estudado: hematita, magnetita, caulinita, quartzo.

Os ensaios de dispersão de solo (*Crumb Test*) foram realizados com seis fluidos diferentes e indicaram uma relação crescente no grau de dispersão conforme ocorre o aumento do pH:

- a) Os torrões imersos em água (pH=7,2); hexametáfosfato de sódio (pH=5,7); na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) foram classificados em grau 2, pois ocorreu pequena reação, o fluido apresentou apenas uma pequena turbidez na superfície da amostra;
- b) Os torrões imersos na solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12); na solução de NaOH 0,001N (pH=13,2); Lixiviado (pH=8,4) foram classificados em grau 3, pois ocorreu uma reação moderada em que se observou uma turbidez com uma fina camada de partículas no fundo do béquer.

6.1 ENSAIO EDOMÉTRICO DUPLO

O Gráfico 5.1 apresentado no Capítulo 5 (pagina 110) mostra as curvas de compressão obtidas a partir dos ensaios edométricos duplos, na umidade de campo e inundado com os fluidos de interesse.

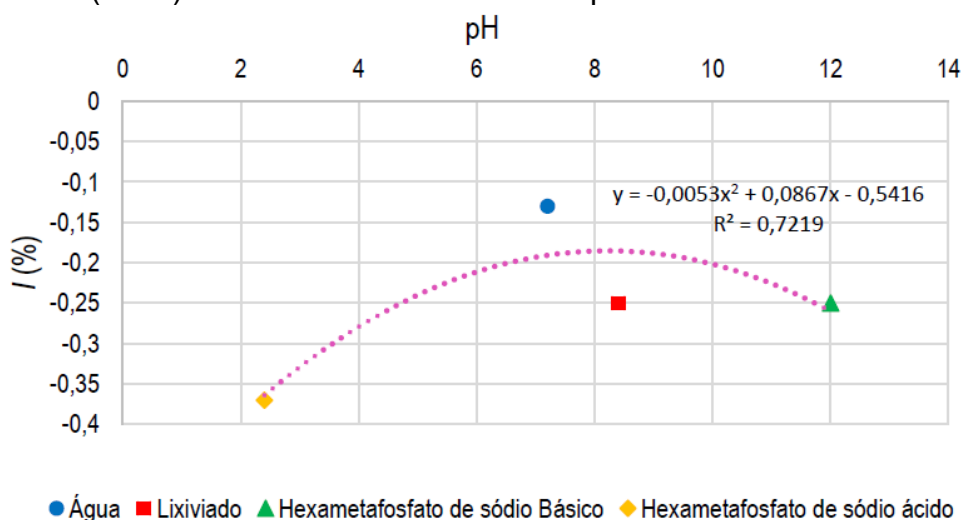
Os fluidos de interesse, utilizados nos ensaios edométricos duplos e simples, foram: água (pH=7,2), lixiviado (pH=8,4) e duas soluções preparada em laboratório (solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio – solução básica pH=12,0; e solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio – solução ácida pH=2,4).

O fenômeno do colapso pôde ser observado em todas as curvas de compressão devido à diferença de traçado entre as curvas.

O solo estudado apresentou os maiores potenciais de colapso (i %) quando inundados nas soluções preparadas em laboratório. Segundo o critério de Reginatto & Ferrero (1973) o solo foi considerado como verdadeiramente colapsível para todos os fluidos de inundação.

O Gráfico 6.1 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Reginatto & Ferrero (1973), em relação ao pH dos fluidos de inundação. Este Gráfico foi elaborado a partir dos resultados dos ensaios edométricos duplos quando inundados com fluidos.

Gráfico 6.1 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos.



Fonte: do próprio autor.

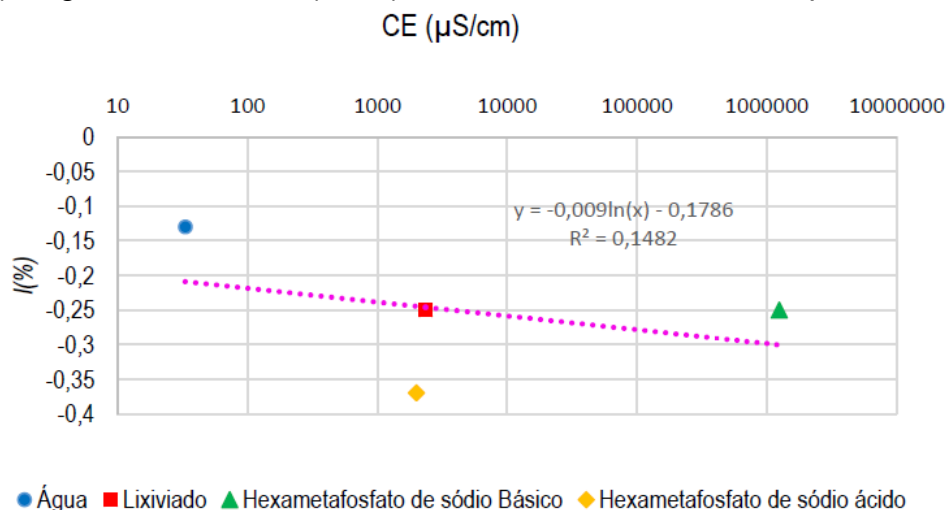
O Gráfico 6.1 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (18) com valor de $R^2= 0,7219$.

$$Y= -0,0053x^2 + 0,0867x - 0,5416 \quad (\text{Equação 18})$$

Não foi possível indicar uma relação única para o potencial de colapso ($i\%$) e o pH das soluções. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme ocorreu o aumento do pH, e nas soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme diminuiu o pH do fluido de inundação.

O Gráfico 6.2 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Reginatto & Ferrero (1973), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo. Também, este Gráfico foi elaborado dos resultados dos ensaios edométricos duplos, quando inundados com fluidos diferentes.

Gráfico 6.2 – CE do extrato aquoso do solo *versus* potencial de colapso – i (%), Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos.



Fonte: do próprio autor.

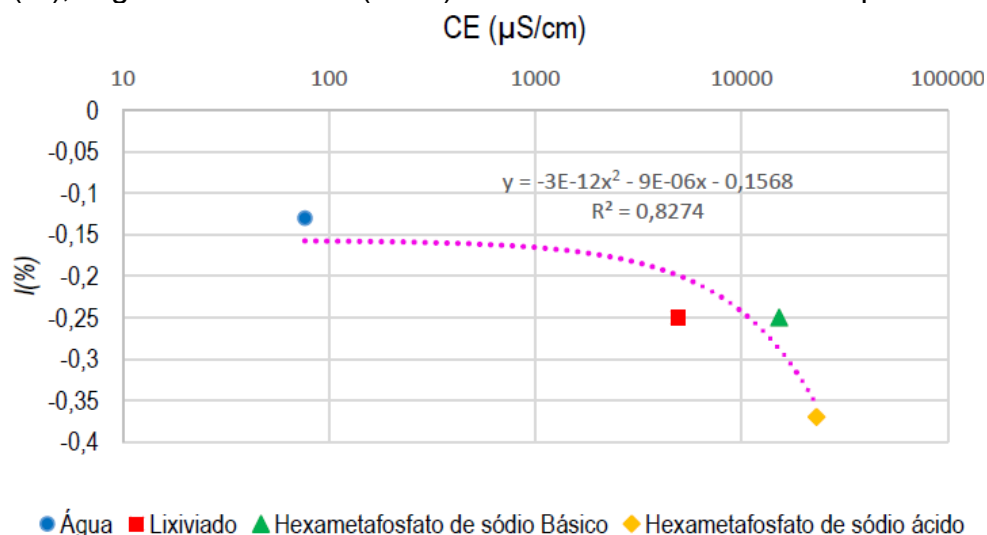
O Gráfico 6.2 indicou uma linha de tendência logarítmica, segundo a Equação (19) com valor de $R^2= 0,1482$.

$$Y= 0,009\ln(x) - 0,1786 \quad (\text{Equação 19})$$

A relação entre o potencial de colapso (i %) e a condutividade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo não apresentou uma correlação única, mas mostrou o mesmo comportamento encontrado no gráfico de potencial de colapso *versus* pH. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme o aumento do CE, e para as soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou com a diminuição da CE do extrato aquoso do solo.

O Gráfico 6.3 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Reginatto & Ferrero (1973), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos duplos quando inundados com fluidos.

Gráfico 6.3 – CE do fluido de inundação *versus* potencial de colapso – i (%), Reginatto & Ferrero (1973) dos ensaios edométricos duplos.



Fonte: do próprio autor.

Existe uma correlação única entre o potencial de colapso (i %) e a condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação. Conforme ocorreu o aumento do potencial de colapso houve aumento da CE do fluido de inundação.

O Gráfico 6.3 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (20) com valor de $R^2 = 0,8274$.

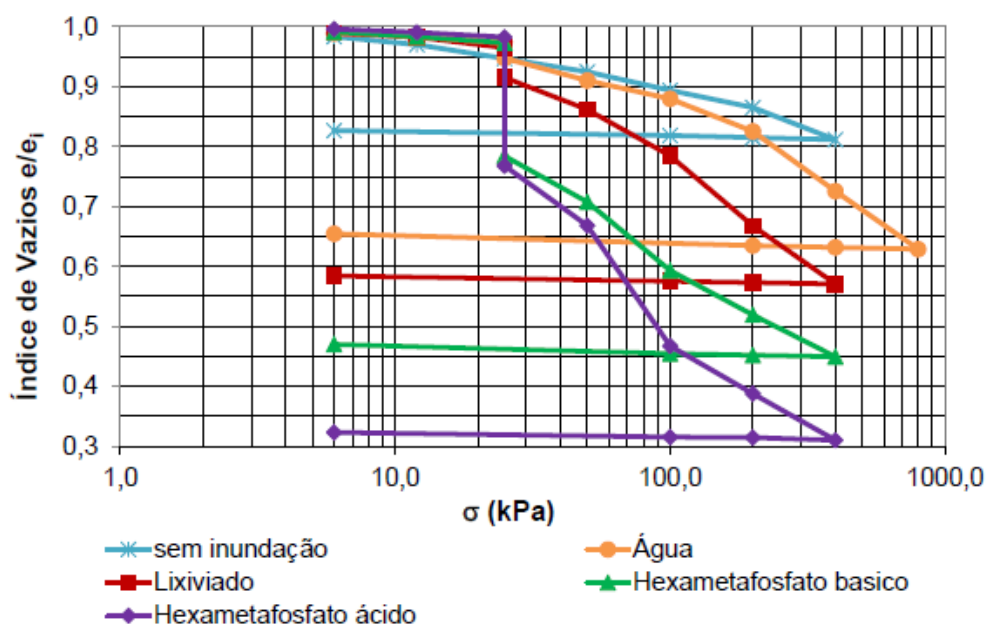
$$Y = -12 \cdot 10^{-3} x^2 - 6 \cdot 10^{-9} x - 0,1568 \quad (\text{Equação 20})$$

A partir destas análises foi observado que o pH e a condutividade elétrica do extrato aquoso do solo não parecem influenciar o fenômeno do colapso de forma linear (única), existe sim uma correlação entre os materiais orgânicos que conforme esses parâmetros aumentam o potencial de colapso tende a aumentar também. Já a condutividade elétrica do fluido de inundação parece influenciar diretamente no potencial de colapso, pois quando ela aumentou também aumentou na magnitude do colapso.

6.2 ENSAIO EDMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 25 kPa

O Gráfico 6.4 apresenta as curvas de compressão obtidas a partir dos ensaios edométricos simples, quando inundados com quatro fluidos de interesse na tensão de 25 kPa.

Gráfico 6.4 – Curvas de compressão obtidas dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.



Fonte: do próprio autor.

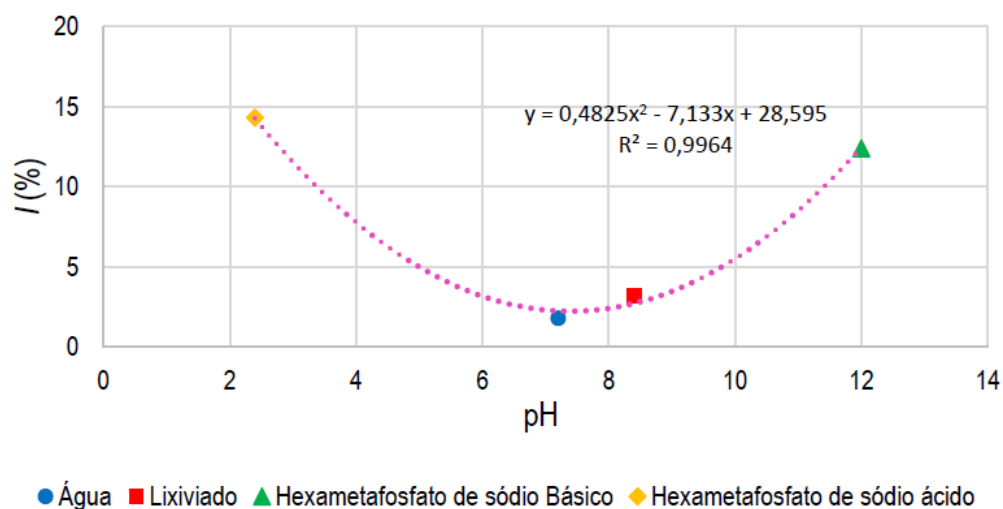
As descontinuidades das curvas do Gráfico 6.4 comprovam o fenômeno do colapso do solo.

O solo estudado apresentou os maiores potenciais de colapso (i %) quando inundados nas soluções preparadas em laboratório. A tensão de inundação é significativamente baixa, porém para estas soluções o potencial de colapso foi bem

expressivo sendo classificado como potencialmente alto, segundo Lutenegger e Sabber (1988). Para as soluções orgânicas foi possível classificar o solo como sendo colapsível para esta tensão, porém em valores menos expressivos que os já mencionados.

O Gráfico 6.5 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegger e Sabber (1988), em relação ao pH dos fluidos de interesse na tensão de inundação de 25 kPa.

Gráfico 6.5 – pH *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.5 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (21) com valor de $R^2 = 0,9964$.

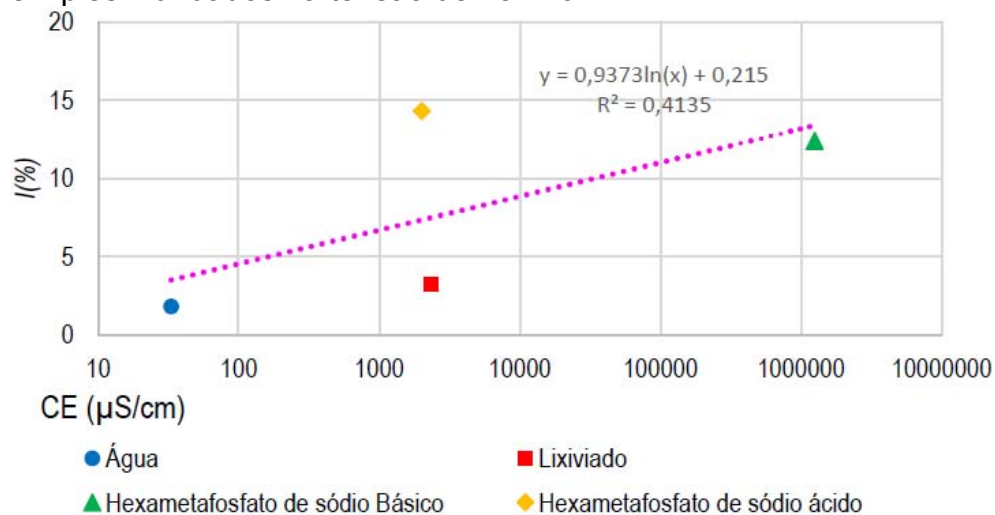
$$Y = 0,4825x^2 - 7,133x + 28,595 \quad (\text{Equação 21})$$

Não foi possível indicar uma relação única para o potencial de colapso ($I\%$) e o pH das soluções. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme ocorreu o aumento do pH. Nas soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme diminuiu o pH do fluido de inundação.

O Gráfico 6.6 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica

(CE) do extrato aquoso do solo. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.

Gráfico 6.6 – CE do extrato aquoso do solo *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.



Fonte: do próprio autor.

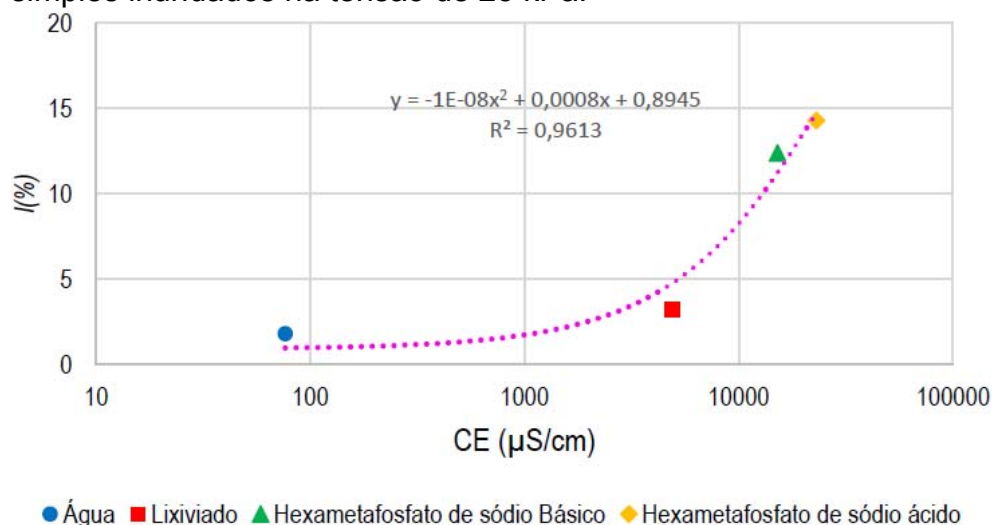
O Gráfico 6.6 indicou uma linha de tendência logarítmica, segundo a Equação (22) com valor de $R^2 = 0,4135$.

$$Y = 0,973 \ln(x) + 0,215 \quad (\text{Equação 22})$$

A relação entre o potencial de colapso (i %) e a condutividade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo não apresentou uma correlação única, mas aparentou o mesmo comportamento encontrado no gráfico de potencial de colapso *versus* pH. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme ocorreu o aumento do CE. Já nas soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme diminuiu o CE do extrato aquoso do solo.

O Gráfico 6.7 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.

Gráfico 6.7 – CE do fluido de inundação *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 25 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.7 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (23) com valor de $R^2 = 0,9613$.

$$Y = -0,8x^2 + 0,0008x + 0,8945 \quad (\text{Equação 23})$$

Existe uma correlação única entre o potencial de colapso (i %) e a condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação. Conforme aumentou o valor do potencial de colapso houve o aumento da CE do fluido de inundação.

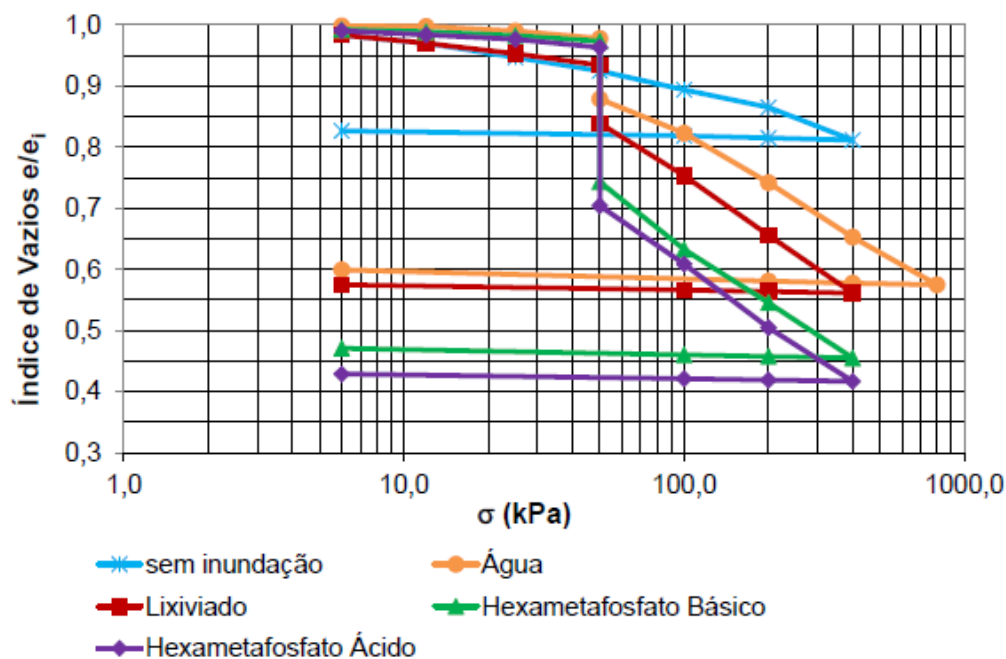
A partir destas análises foi observado que o pH e a condutividade elétrica do extrato aquoso do solo não parecem influenciar o fenômeno do colapso de forma linear (única), existe sim uma correlação entre os materiais orgânicos que conforme esses parâmetros aumentam o potencial de colapso tende a aumentar também. Existe uma correlação entre as soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) que indicam diminuição dos valores dos parâmetros e o aumento potencial de colapso.

A condutividade elétrica do fluido de inundação parece influenciar diretamente no potencial de colapso, pois conforme ele aumenta ocorre aumento na magnitude do colapso.

6.3 ENSAIO EDOMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 50 kPa

O Gráfico 6.8 apresenta as curvas de compressão obtidas a partir dos ensaios edométricos simples quando inundados nos quatro fluidos de interesse na tensão de 50 kPa. As descontinuidades das curvas comprovam o fenômeno do colapso do solo.

Gráfico 6.8 – Curvas edométricas obtidas dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.



Fonte: do próprio autor.

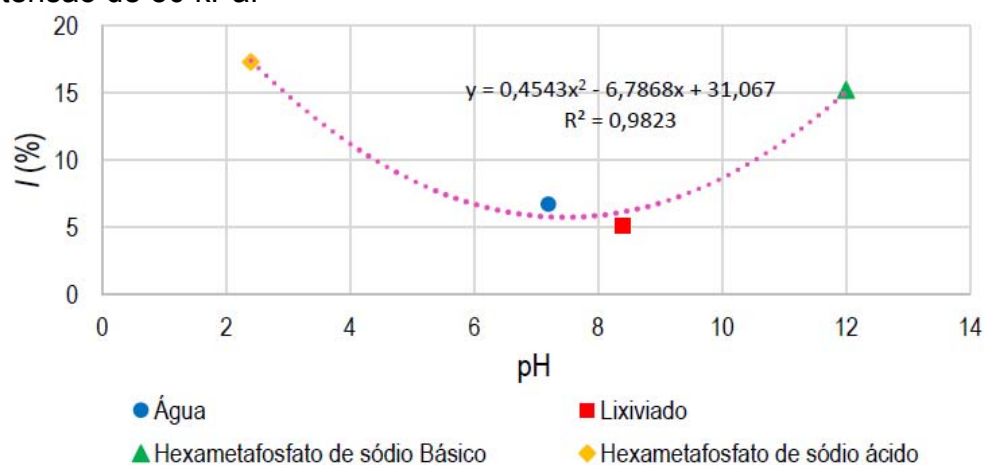
O solo estudado apresentou os maiores potenciais de colapso (I_c) quando inundados nas soluções preparadas em laboratório. Nesta tensão de inundaçao somente quando inundado com lixiviado o potencial de colapso foi classificado como potencialmente moderado, segundo Lutenegeger e Sabber (1988). Quando inundados nos outros fluidos o potencial de colapso foi bem expressivo sendo classificado como potencialmente alto, segundo Lutenegeger e Sabber (1988). Para as soluçoes preparadas em laboratório os valores foram expressivos e bem maiores que os valores encontrados quando inundado em água.

Nesta tensão de inundaçao, 50 kPa, o valor do potencial de colapso (I_c) quando inundado em água foi maior que quando inundado em lixiviado. Estes valores contradizem a tendencia encontrada nas outras tensões de inundaçao. Isto pode ter ocorrido devido a variaçao dos valores de indice de vazios, sendo maiores

no solo inundado em água. Porém nas outras cargas de inundação o potencial de colapso (i %) quando inundado em lixiviado foi superior aos valores encontrados quando inundado em água.

O Gráfico 6.9 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao pH dos fluidos de interesse na tensão de inundação de 50 kPa.

Gráfico 6.9 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.9 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (24) com valor de $R^2 = 0,9823$.

$$Y = 0,4543x^2 - 6,7868x + 31,067 \quad (\text{Equação 24})$$

Não foi possível indicar uma relação única para o potencial de colapso (i %) e o pH das soluções. As soluções orgânicas não apresentam uma relação crescente conforme ocorre o aumento do pH. Estes valores contradizem os encontrados nos outros ensaios e isso ocorreu devido a influencias de alguns índices físicos na magnitude do colapso do solo.

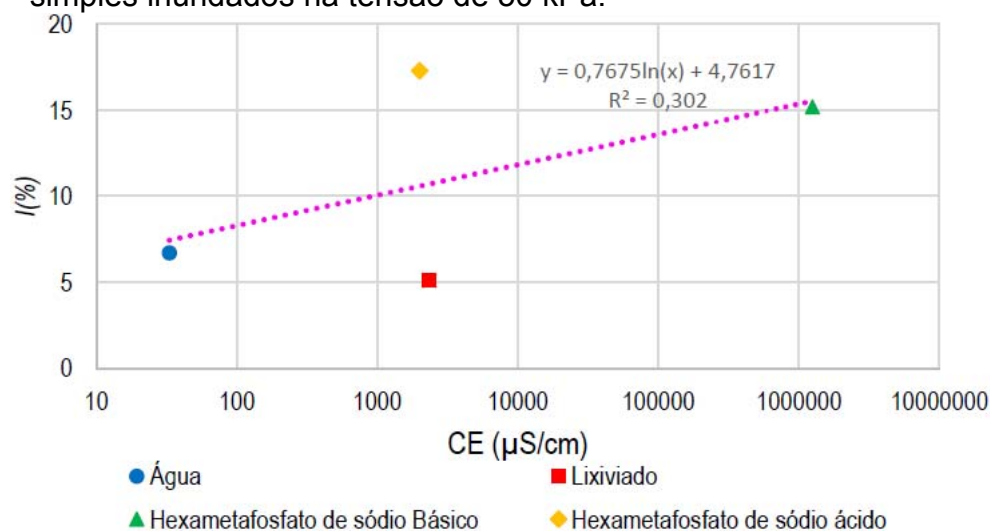
Nos corpos de prova inundados em lixiviado na tensão de 50 kPa foram encontrados: menor índice de vazios inicial, maior massa específica seca inicial e maior grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova que foi inundado com água na tensão de 50 kPa. Esta diferença nos

índices físicos fez com que o potencial de colapso do corpo de prova inundado com água fosse maior que o inundado em lixiviado, nesta tensão de inundação.

Para as soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme diminuiu o pH do fluido de inundação.

O Gráfico 6.10 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.

Gráfico 6.10 – CE do extrato aquoso do solo *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.10 indicou uma linha de tendência logarítmica, segundo a Equação (25) com valor de $R^2= 0,302$.

$$Y = 0,7675 \ln(x) + 4,7617 \quad (\text{Equação 25})$$

A relação entre o potencial de colapso (i %) e a condutividade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo não apresentou uma correlação única, mas mostraram o mesmo comportamento encontrado no gráfico de potencial de colapso *versus* pH. As soluções orgânicas apresentaram uma relação decrescente com aumento da CE.

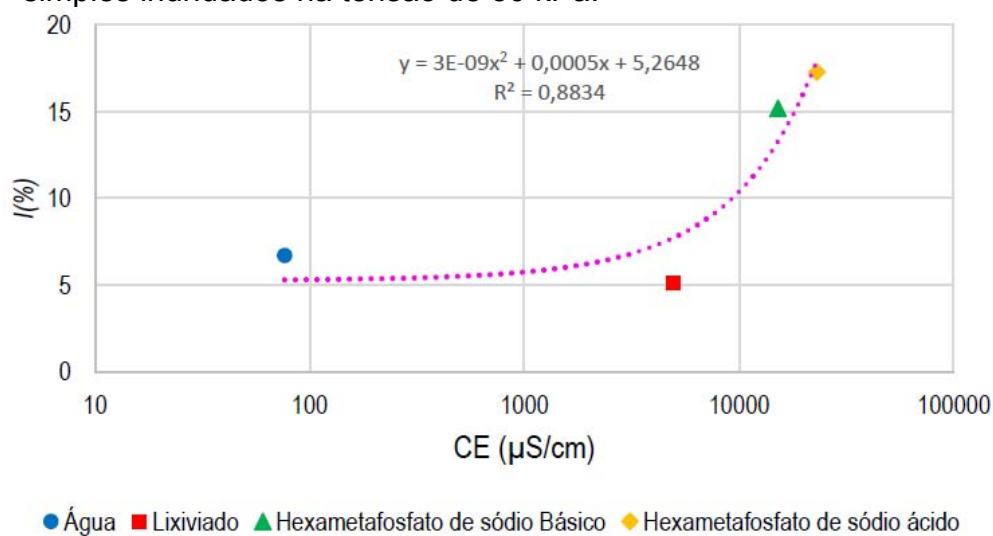
Estes valores contradizem os encontrados nos outros ensaios e isso se deve a influência dos índices físicos sobre a magnitude do colapso do solo. O

corpo de prova inundado com lixiviado apresentou: menor índice de vazios inicial, maior massa específica seca inicial e maior grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova que foi inundado com água (pH=7,2) na tensão de 50 kPa. Isto fez com que o potencial de colapso, quando inundado em água, fosse maior que quando inundado em lixiviado.

Para as soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme diminuiu a CE do extrato aquoso do solo.

O Gráfico 6.11 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.

Gráfico 6.11 – CE do fluido de inundação *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) do ensaios edométricos simples inundados na tensão de 50 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.11 indica uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (26) com valor de $R^2 = 0,9823$.

$$Y = -0,009x^2 - 0,0005x + 5,2648 \quad (\text{Equação 26})$$

Neste grupo de ensaios realizados em uma mesma tensão de inundação não aparece uma correlação única entre o potencial de colapso (i %) e a

condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação. Somente as soluções orgânicas apresentaram uma relação decrescente com o aumento da CE.

Este fenômeno contradiz aos encontrados nos outros ensaios e isso ocorreu por causa do menor índice de vazios inicial, da maior massa específica seca inicial e do maior grau de saturação inicial no corpo de prova, quando inundado com lixiviado, em relação aos valores encontrados no corpo de prova quando inundado com água.

Porém para as soluções preparadas em laboratório (pH=2,4 e pH=12) o potencial de colapso aumentou conforme ocorreu o aumento da CE do fluido de inundação.

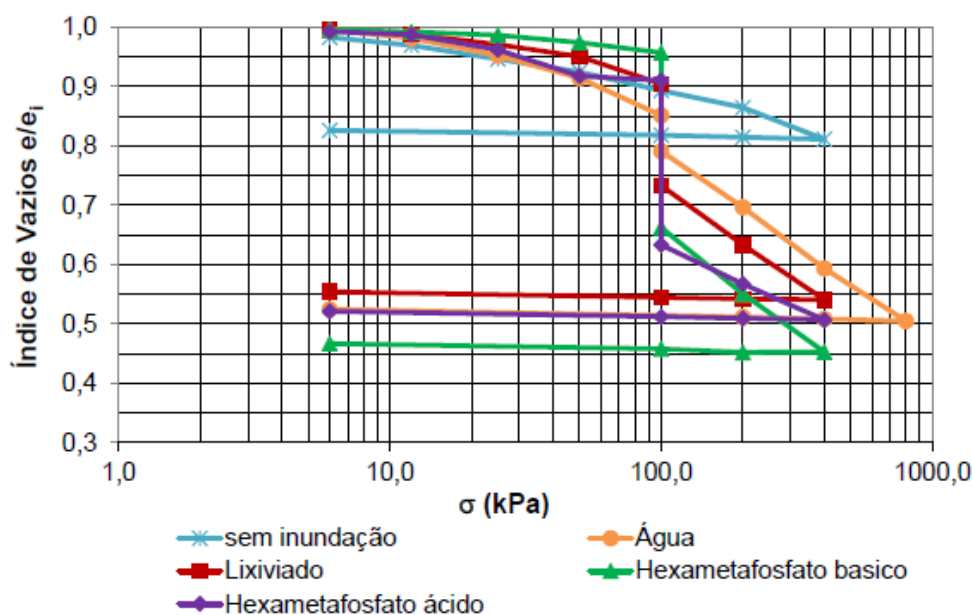
A partir destas análises foi observado que o pH e a condutividade elétrica do extrato aquoso do solo não parecem influenciar o fenômeno do colapso de forma linear (única). Existe sim, uma correlação entre o aumento do pH e da CE dos materiais orgânicos levam a diminuição do potencial de colapso. Para a condutividade elétrica do fluido de inundação não foi possível estabelecer uma correlação única confiável com o potencial de colapso. Estas conclusões contradizem as tendências encontradas nas outras tensões de inundação, de 25 e 100 kPa. Isto ocorreu devido a influência dos índices físicos na magnitude do colapso do solo.

O corpo de prova inundado com lixiviado apresentou: menor índice de vazios inicial, maior massa específica seca inicial e maior grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova inundado com água na tensão de 50 kPa. Estas variações encontradas nos índices físicos, fizeram com que o potencial de colapso quando inundado em água fossem maior que quando inundado em lixiviado, nesta tensão de inundação (50 kPa). A influencia da massa específica seca inicial e o grau de saturação foi observada nos estudos de Popescu (1986) e Lawton *et al.* (1992), e a influencia do indice de vazios inicial foi constatado por Gutierrez (2005).

6.4 ENSAIO EDOMÉTRICO SIMPLES INUNDADO NA TENSÃO DE 100 kPa

O Gráfico 6.12 apresenta as curvas de compressão obtidas a partir dos ensaios edométricos simples quando inundados nos quatro fluidos de interesse na tensão de 100 kPa.

Gráfico 6.12 – Curvas edométricas obtidas dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.



Fonte: do próprio autor.

As descontinuidades das curvas comprovam o fenômeno do colapso do solo.

O solo estudado apresentou os maiores potenciais de colapso (I_c) quando inundados nas soluções preparadas em laboratório. Nesta tensão de inundação somente quando inundado com água o potencial de colapso foi classificado como potencialmente moderado, segundo Lutenegeger e Sabber (1988). Quando inundados nos outros fluidos o potencial de colapso foi bem expressivo sendo classificado como potencialmente alto, segundo Lutenegeger e Sabber (1988). Para as soluções preparadas em laboratório os valores foram expressivos e bem maiores que os valores encontrados quando inundado em lixividado.

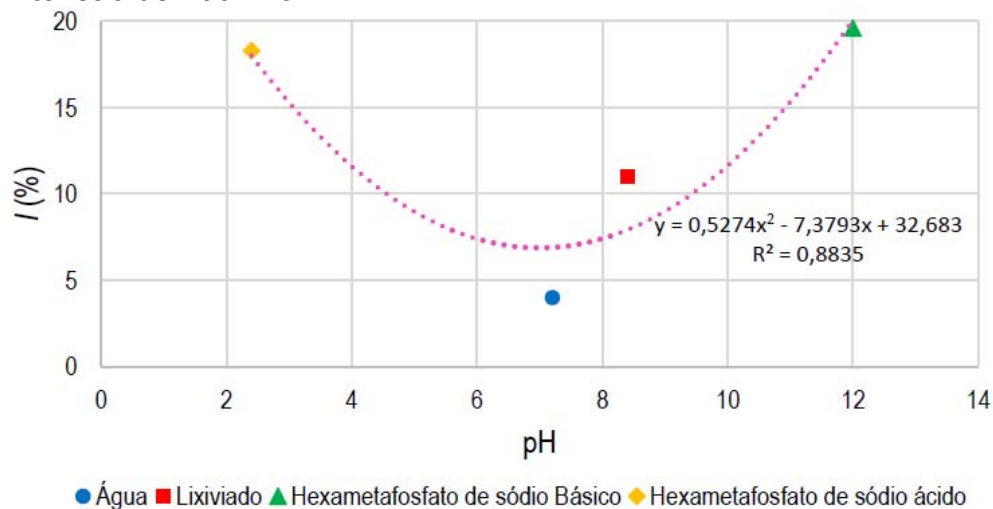
Na tensão de 100 kPa o maior potencial de colapso (I_c) ocorreu no corpo de prova quando inundado na solução de hidróxido de sódio com

hexametáfosfato de sódio (pH=12,0). Este valor de potencial de colapso foi o oposto ao encontrado nas outras tensões (25 e 50 kPa), onde o maior valor de potencial de colapso ocorreu nos corpos de prova quando inundados com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4).

Diversos fatores contribuíram para a elevação na magnitude do colapso, sendo eles: maior índice de vazios inicial, menor teor de umidade inicial, menor massa específica seca inicial e menor grau de saturação inicial em relação aos valores obtidos para o corpo de prova que foi inundado na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 100 kPa.

O Gráfico 6.13 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação ao pH dos fluidos de interesse na tensão de inundação de 100 kPa.

Gráfico 6.13 – pH versus potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.13 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (27) com valor de $R^2 = 0,8835$.

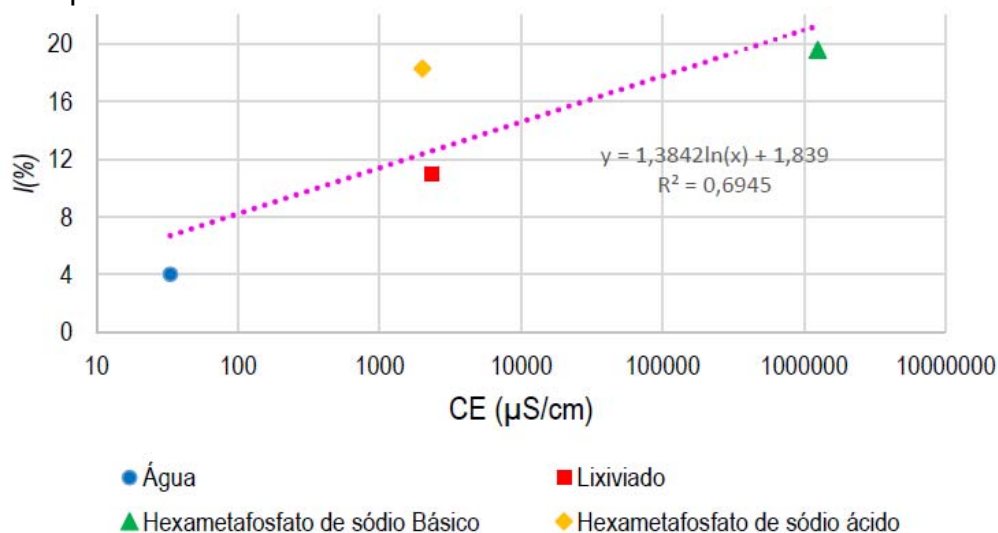
$$Y = 0,5274x^2 - 7,3793x + 32,683 \quad (\text{Equação 27})$$

Não foi possível indicar uma relação única para o potencial de colapso (i %) e o pH das soluções. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme ocorreu o aumento do pH.

Porém nas soluções de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12,0) e solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) o potencial de colapso (i %) foi de 19,60% e 18,30%, respectivamente. Portanto, apresentou uma diferença pequena entre os valores de potencial de colapso de 1,3%, ou seja, uma diferença pouco significativa. Sendo assim é possível concluir que o pH do fluido de inundação não exerceu influência sobre o potencial de colapso dos corpos de prova quando inundados com as soluções preparadas em laboratório, haja visto que ambas possuem valores extremamente diferentes de pH (sendo uma ácida e outra básica).

O Gráfico 6.14 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegeger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.

Gráfico 6.14 – CE do extrato aquoso do solo *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegeger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.14 indica uma linha de tendência logarítmica, segundo a Equação (28) com valor de $R^2 = 0,6945$.

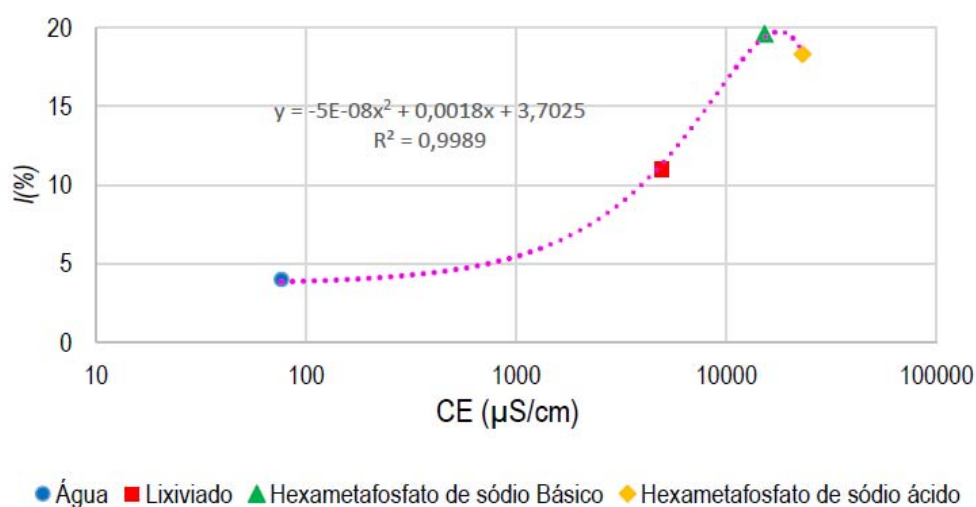
$$Y = 1,3842\ln(x) + 1,839 \quad (\text{Equação 28})$$

A relação entre o potencial de colapso ($I\%$) e a condutividade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo não apresentou uma correlação única, mas mostrou o mesmo comportamento encontrado no gráfico de potencial de colapso *versus* pH. As soluções orgânicas apresentaram uma relação crescente conforme ocorreu o aumento do CE.

Porém no extrato aquoso do solo inundado nas soluções de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio ($CE = 1,249 \cdot 10^6 \mu S \cdot cm^{-1}$) e solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio ($CE = 2,00 \cdot 10^3 \mu S \cdot cm^{-1}$) o potencial de colapso ($I\%$) foi de 19,60% e 18,30%, respectivamente. Portanto, apresentou uma diferença pequena entre os valores de potencial de colapso de 1,3%, ou seja, uma diferença pouco significativa. Sendo assim foi possível concluir que a CE do extrato aquoso do solo não exerceu influência sobre o potencial de colapso, haja vista que ambas possuem valores extremamente diferentes de CE do extrato aquoso.

O Gráfico 6.15 apresenta a variação do potencial de colapso – i (%), obtido segundo Lutenegger e Sabber (1988), em relação à condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação. Este Gráfico foi elaborado baseado nos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.

Gráfico 6.15 – CE do fluido de inundação *versus* potencial de colapso – i (%), segundo Lutenegger e Sabber (1988) dos ensaios edométricos simples inundados na tensão de 100 kPa.



Fonte: do próprio autor.

O Gráfico 6.15 indicou uma linha de tendência polinomial de ordem 2, segundo a Equação (29) com valor de $R^2= 0,9989$.

$$Y= -0,00008x^2 + 0,0018x + 3,7025 \quad (\text{Equação 29})$$

Existe uma correlação única entre o potencial de colapso ($I\%$) e a condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação.

Nas soluções de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio ($\text{pH}=12,0$) e solução de o ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio ($\text{pH}=2,4$) o potencial de colapso ($I\%$) foi de 19,60% e 18,30%, respectivamente. Portanto, apresentou uma diferença pequena entre os valores de potencial de colapso de 1,3%, ou seja, uma diferença pouco significativa. O que difere da tendência observada nas outras tensões (25 e 50 kPa), onde os maiores valores de potencial de colapso ocorreram na solução ácida preparada em laboratório. Haja vista que a diferença entre os potenciais de colapso é muito pequena é possível manter a correlação de que conforme ocorreu o aumento do potencial de colapso há o aumento do CE do fluido de inundação.

A partir destas análises foi possível concluir que o pH dos fluidos de inundação e a condutividade elétrica do extrato aquoso do solo tendem a não influenciar magnitude do colapso de forma linear (única). Existe sim uma correlação entre os materiais orgânicos que conforme esses parâmetros aumentam o potencial de colapso conforme aumenta os valores de pH e CE. Para as soluções preparadas em laboratório não ocorreu diferença significativa nos valores do potencial do colapso. Já a condutividade elétrica do fluido de inundação parece influenciar diretamente no potencial de colapso, pois conforme ele aumentou ocorreu aumento na magnitude do colapso.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do fluido de inundação no comportamento colapsível do solo do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina, de 2m de profundidade. Este solo é formado por uma argila porosa laterítica, que apresenta baixo teor de umidade, elevada porosidade e é considerado característico da região da cidade de Londrina/PR (TEIXEIRA *et al.*, 2004, TEIXEIRA *et al.*, 2008).

A avaliação proposta foi realizada utilizando quatro fluidos distintos para a inundação, com o intuito de analisar as possíveis interações entre o solo e o fluido de inundação e o efeito que esta interação gera no potencial de colapso. Com tudo foi possível avaliar a interação físico-química entre o solo e o fluido de inundação e efeito no fenômeno do colapso do solo.

Nos ensaios de análise química do solo natural foram observados valores comumente encontrados nos solos lateríticos, como os encontrado na região de Londrina/PR.

Nas análises químicas dos solos inundados com os fluidos de interesse, após os ensaios edométricos, ocorreram alterações nas suas composições químicas em relação ao solo natural. As maiores alterações nos parâmetros medidos ocorreram nas amostras inundadas com os fluidos preparados em laboratório. Nestas amostras foram encontrados altos teores de fósforo, devido à adição deste elemento via a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio, a qual apresenta os maiores valores de fósforo.

A análise de DRX indicou os principais constituintes mineralógicos do solo estudado: hematita, magnetita, caulinita e quartzo. Esta composição mineralógica é comumente encontrada nos solos da região de Londrina/ PR.

Os ensaios de dispersão de solo (*Crumb Test*) foram realizados com os seis fluidos diferentes e apresentaram uma relação crescente do grau de dispersão conforme o aumento do pH do fluido.

A partir da análise dos ensaios de condutibilidade elétrica (CE) do extrato aquoso do solo, que indicou a concentração de íons solúveis na solução de solo, foi possível concluir que o solo inundado na solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio obteve a maior concentração de íons solúveis, seguidos do solo inundado em lixiviado e na solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato

de sódio. O solo inundado em água obteve a menor concentração de íons solúveis no solo. Quanto maior a CE do extrato aquoso do solo maior é a corrente elétrica conduzida pela solução, por isso o solo inundado na solução básica de hexametáfosfato de sódio conduziu maior corrente elétrica que os demais solos.

Dos ensaios de condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação, que indicam a facilidade pela qual o fluido tem de interagir com o solo, foi possível concluir que as soluções preparadas em laboratório produzem as maiores condutividades elétricas (CE) do fluido de inundação, sendo o maior valor encontrado para a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio, seguido da solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio e do lixiviado. A água mostrou o menor valor de condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação.

Nos ensaios edométricos duplos o solo foi considerado colapsível para todos os fluidos de inundação utilizados. Segundo os critérios baseados em índices físicos e nos limites de Atterberg o solo pode ser classificado como colapsível quando avaliado pelo critério de Gibbs e Bara, e Feda (S_0 , baseado no grau de saturação inicial). Os critérios de Prikloński e Feda (K) classificam o solo como expansivo e não colapsível, respectivamente, e por isso não são aconselháveis para a realização de tal avaliação no solo estudado, uma vez que este solo não contém minerais e ou características expansivas.

O comportamento colapsível também foi confirmado para os critérios baseados nos ensaios edométricos simples, em todas as tensões de interesse e em todos os fluidos de inundação. Foi possível também confirmar que o potencial de colapso tende a aumentar com o aumento da tensão de inundação (25, 50 e 100 kPa) para um mesmo fluido de inundação. Isto ocorreu para as tensões de inundação estudadas, pois o potencial de colapso tende a aumentar até uma tensão limite, após essa tensão crítica ele tende a se manter constante ou até mesmo diminuir (VARGAS, 1973 *apud* GUTIERREZ, 2005).

Os maiores índices de colapso foram observados após a inundação com as soluções: hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (solução básica pH=12) e ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (solução ácida pH=2,4).

O pH e a condutividade elétrica do extrato aquoso do solo não parecem influenciar o fenômeno do colapso de forma linear (única). Existe sim uma correlação entre as soluções orgânicas (água e lixiviado) que conforme o aumento

do pH e a condutividade elétrica do extrato também tende a aumentar o potencial de colapso. Os solos inundados com os fluidos preparados em laboratório não apresentam diferenças significativas no potencial de colapso (*1 %*), esse comportamento também foi observado por Collares (2002). Esta correlação é observada nos ensaios edométricos duplos e simples.

A condutividade elétrica (CE) do fluido de inundação parece influenciar diretamente no potencial de colapso, pois conforme seu aumento ocorreu aumento na magnitude do colapso. Esta correlação foi observada nos ensaios edométricos duplos e simples e também por Collares (2002).

Foi possível concluir que o fluido de inundação interfere no potencial de colapso e por isso existe uma correlação entre o colapso do solo e as reações físico-químicas entre o solo e o fluido de inundação. O potencial de colapso está correlacionado a um conjunto de fatores, tais como, pH e condutividade elétrica, índices físicos do solo, entre outros. Neste estudo a condutividade elétrica do fluido de inundação teve uma correlação direta com o mecanismo do colapso, pois foi encontrada uma tendência entre o aumento da condutibilidade elétrica (CE) do fluido de inundação e o aumento no potencial de colapso (*i %*).

Portanto, as alterações químicas ocorridas no solo devido à interação entre o solo e o fluido de inundação influenciaram no potencial de colapso.

Um estudo mais avançado e minucioso sobre o fenômeno do colapso do solo na região de Londrina/PR deve ser realizado a partir dos resultados e análises apresentadas neste estudo. Sugestões para trabalhos futuros:

1. Avaliar o potencial de colapso do solo usando outros fluidos de inundação, em pH diversos e concentrações diferentes das estudadas.
2. Analisar o solo do CEEG de outras profundidades e após a compactação.
3. Avaliar a estrutura do solo natural antes e depois do colapso através da análise da micromorfologia do solo, para observar as alterações ocorridas na estrutura do solo depois do colapso.
4. Uma análise mais minuciosa das alterações químicas do solo após a inundação pode levar a uma correlação interessante com o potencial do colapso do solo.

5. Avaliar os constituintes mineralógicos do solo após a inundação.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13601**: Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*). Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Ensaio de Adensamento Unidirecional. Rio de Janeiro, 1990.
- ALBUQUERQUE, P. J. R.; MIGUEL, M. G.; SAUEIA, F. N.; HAJNAL, V. H. J.; CARVALHO, D. **Avaliação de um Solo Laterítico Coluvionar de Campinas/SP, por Diferentes Procedimentos de Determinação de Índices Físicos**. 2005. Disponível em: < <http://www.fec.unicamp.br/~pjra/Arquivo9.pdf> >. Acesso em: 03 maio 2014.
- ALMEIDA, M. A. **Comportamento de estacas apiloadas em primeiro estrato laterítico da região de Londrina/PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, 2004.
- BANDEIRA, A. P. N.; SOUZA NETO, J. B.; MELO, C. E.; MOREIRA, E. B. Caracterização de solos colapsáveis no município de Juazeiro do Norte, interior do Ceará. In: COBRAMSEG, XVI, 2012, Porto de Galinhas-PE. **ABMS**, 2012. n. 217. p. 1-8
- BARATA, F. E. “Algumas considerações críticas sobre “lateritas” e “materiais lateríticos” – necessidade de terminologia brasileira adequada”. *Proc. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, **COPPE/UFRJ, CNPQ, ABMS**, Rio de Janeiro, Setembro, 1981.
- BARDEN & SIDES, G. R. *The Influence of Structure on the Collapse of Compacted Clay*. In: INT. RES. AND ENG. CONF. ON EXPANSIVE CLAYS, 2. **Proceedings, Texas A&M University**, 1969. P.317-326.
- BARROS, Omar Neto Fernandes et al. **Solo**. Disponível em: < <http://www.uel.br/revistas/atlasambiental/NATURAL/SOLOS.htm> >. Acesso em: 19 nov. 2013.
- BENITES, V. M. & MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campus da UFV, Viçosa/MG, v. 22, p. 215-221, 1998.
- BHERING, S. B. & SANTOS, H. G. dos. **Mapa de solos Estado do Paraná: legenda atualizada**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro e Embrapa Florestas, Colombo/PR, 2008. 74p.

BIGARELLA, J.J., BECKER, R. D. & PASSOS, E. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Volumes 1 e 2, Ed. UFSC. Florianópolis – SC, 1996.

BRAGANÇA, ANA CRISTINA COLIL RAMOS. **Avaliação de Reagentes Alternativos para Substituição da Cal em Sistemas de Bombeamento de Longa Distância de Polpa de Minério de Ferro**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. 2008. p. 102.

BRANCO, C.J.M da C.; MIGUEL, M.G.; PINESE, P.P. e TEIXEIRA, R.S., 1998. Implantação do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica no Campus da UEL. **Anais: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, v. II., Brasília/DF, 06 a 10 de novembro, 1998.

BRANCO, C. J. M. C.; MIGUEL, M. G. e TEIXEIRA, R. S., 2000. **Estudo do Comportamento de Estacas Hélice Contínua Monitoradas em solo argiloso mediante provas de carga e métodos semi empíricos**. In: 4 Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica, SEFE IV - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica, ABEF - Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotécnica, São Paulo, 2000, v. 1, p. 116-126.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; NUNES, P. M.; BERBERIAN, D. & FERREIRA, E. S. **Influencia Del pH Del líquido de saturation em La Colapsabilidad**. VIII CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Cartagena - Colômbia, 1987, V.2, p.1-8.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Instituto Agronômico de Campinas, Boletim Técnico, nº 106, 1986. 94p.

CAPECHE, C. L. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista**. 2008. Disponível em: < http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/comtec51_2008_nocoos_estrutura_sol_o.pdf > Acesso em: 02 maio 2014.

CARVALHO, M. F. **Estudo de solos colapsíveis no Nordeste do Estado de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, 137 p, 1994.

CARVALHO, J.C. de. & LEROUEIL, S. Curva característica e sucção transformada. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v.27, n.3, p.231-242, 2004.

CASANOVA, F. J. O. C. Eletroquímica e propriedades mecânicas dos solos. In: II Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e suas aplicações em Engenharia Civil. **CPGEC/ UFRGS**, Porto Alegre, p. 43-58, 1989.

CASARIL, C. C. **Meio século de verticalização urbana em Londrina-PR e sua distribuição espacial: 1950-2000**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Estadual de Londrina. Londrina-PR, 2008.

CINTRA, J. C. A. **Fundações em solos colapsíveis**. EESC – USP, São Carlos, 116 p, 1998.

COCIANI, Wilson; BARBOSA, Fabiani Maria Dalla Rosa. Recalques diferenciais provocados por inundação do solo com água quente e cáustica. In: GEOCENTRO, 3º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste; 6º Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos, 2013, Centro de Eventos Pantanal – Cuiabá – MT. **ABMS**. Cuiabá: KCM Editora, 2013. p. 178-186.

COLLARES, ANA CARINA ZANOLLO BIAZOTTI. **A Influência de Características Químicas do Fluido De Saturação no Colapso dos Solos**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1997. p. 96.

COLLARES, A. C. Z. B.; **Influência de fatores estruturais e químicos no colapso de dois solos**. Tese de doutorado, EESC – USP, São Carlos, 2002.

COLLOIDS - COMMUNITY. **Interfaces, Colloids and Gels**. 1999. Disponível em: < <http://community.dur.ac.uk/sharon.cooper/lectures/colloids/interfacesweb2.html> >. Acesso em: 26 fev. 2014.

CHRISTONI, A. R. F.; TEIXEIRA, R. S, Fundação Araucária. **Estudo das Características Químicas e Mineralógicas do Perfil de Solo Laterítico e Residual Típico da Cidade de Londrina/Pr**. Londrina: EAIC, [2014], p. 22.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 7ª ed., 612 p, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 213: Solos – Determinação de Teor de Umidade**. Mato Grosso, 1994.

DENISOV, N. Y. *The engeneering properties of loess and loess Loans*. **Gosstroirzdat**, Moscow, 136 p. 1951.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta**. 2010. Disponível em: < http://200.7.175.130/agroumsa/sites/default/files/repositorio/cap_09_Efeitos%20%dos%20sais%20no%20solo%20e%20na%20planta.pdf >, Acesso em 25 mar 2014.

DUDLEY, J. H. Review of collapsing soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, **ASCE**, 1970, v. 96, n. SM3, p. 925-947.

EMBRAPA/IAPAR. 1984. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. **Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba, 1984. 2v.: il. (EMBRAPA - SNLCS. Boletim técnico; n. 27).

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa. Rio de Janeiro. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. EMBRAPA, Rio de Janeiro/RJ, 212p. 1997.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa. Rio de Janeiro. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa Produção de Informação & Embrapa Solos, Brasília, 412p. 2013.

EMBRAPA FLORESTAS; LABORATÓRIO DE MONITORAMENTO AMBIENTAL, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Mapa Simplificado dos Solos do**

Estado do Paraná. 2012. Disponível em: < http://www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/mapa_solos_pr.pdf > Acesso em 14 mar. 2014.

FARIAS, W. M.; MARTINS, E. de S.; CARDOSO, F. B. da F., CAMAPUM DE CARVALHO, J. A influência do Oxi-Hidróxido de Fe matricial no comportamento mecânico de solos tropicais em áreas de disposição de resíduos sólidos. **Espaço & Geografia**, v.6, n.2 , p. 115-131, 2003.

FEDA, J. *Structural stability of subsident loess soil from praha-dejvice*. **Engineering geology**. Amsterdam, v.1, n3, março, p.201-219, 1966.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; PEREIRA, A. **Análise do potencial colapso de solos coluvionares da formação Serra Geral/RS**. In: V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos/SP, 2004, v. I, p. 431-437.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A., SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, jul./set. 2001.

FUTAI, M. M. **Comportamento Colapsível de Solos Tropicais Brasileiros**. In: VII Congresso Nacional de Geotécnica, Porto, 2000, v.1, p.193-204.

FUTAI, M. M. **Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: aplicação a um caso de voçorocamento**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. 2002, 559p.

GARCIA, Jean Rodrigo; RODRIGUES, Roger Augusto ; ; LOLLO, José Augusto de. A Influência de Diferentes Fluidos de Inundação no Colapso Estrutural de um Solo Arenoso Laterítico. **Civil Engineering Journal**, Guimarães, v. 21, p. 49-58, 2004.

GIBBS, H. J. & BARA, J. P. Stability problems of collapsing soil. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. ASCE, V.3, n.SM4, p. 577-594, 1967.

GONÇALVES, R. L.; MOREIRA, E. M. S.; MIGUEL, M. G.; BELINCANTA, A. Provas de carga em estacas escavadas com trado manual preenchidas com solo-cimento plástico. In: IV Encontro Tecnológico da Engenharia e Arquitetura de Maringá, **Universidade Estadual de Maringá**, Maringá/PR, 2003, v. 2. p. 397-405.

GUTIERREZ, N. H. M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos no norte do Paraná**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2005, 311p.

GUTIERREZ, N. H. M.; NOBREGA, M. T. de; VILAR, O. M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil. **Bulletin for Engineering Geology and the Environment**, IAEG,, v.68, n.1, p.107-116, 2009

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. **The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsolils on wetting**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Proceedings, 1957, v.1, p. 316-319.

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. ***A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "collapse of grain structure"***. In: Regional Conference for African on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Durban, 1975.

LAWTON, E. C.; FRAGASZY, R. J.; HETHERINGTON, M. D. Review of wetting-induced collapse in compacted soil. **Journal of Geotechnical. Engineering**, 118-9, 1376-1394, 1992.

LOLLO, J. A.. **Solos colapsáveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas.** – São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-reitoria de graduação, 2008.

LOPES, FABIANA FLORE. **Avaliação do Comportamento Colapsível da Camada de Solo Superficial da Região De Londrina/Pr.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Departamento de construção Civil da Universidade Estadual de Londrina. 2002. p. 114.

LUTENEGGER, A. J.; SABBER, R.T. **Determination of collapse potential of soils.** Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1988, v. 11, n. 3, p 173-178.

MANSO, NAGILA NARIANE PIRES. **Estudo do Colapso no Solo da Central de Tratamento de Resíduos de Londrina.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Departamento de construção Civil da Universidade Estadual de Londrina. 2011. p. 67.

MARIZ, D. F. & CASANOVA, F. J. Alguns aspectos relevantes no mecanismo do colapso de solos do Planalto Central. In: I Simpósio Sobre Solos Não Saturados, **AMSF-UFPE/ ABMS-NE**, Recife, PE, 1994. p.129-134.

MELO, H. N. S.; MIRANDA, R. J. A.; ANDRADE NETO, C. O.; LUCAS FILHO, M. **Salinização no pós-tratamento de esgotos por disposição controlada no solo.** 2001. Disponível em: < <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/coletanea2/ART5.pdf> >, Acesso em 25 mar 2014.

MEUER, E. J. **Fundamentos da química do solo.** Porto Alegre: Genesis, 2 ed., 2004.

MIGUEL, M. G.; BELINCANTA, A. Avaliação do coeficiente de majoração da resistência lateral de estacas escavadas com trado manual em solo laterítico de Londrina/PR. In: V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica - V SEFE, **ABEF/ABMS**, São Paulo, 2004, v. 2, p. 411-420.

MIGUEL, M. G., BELINCANTA, A., BRANCO, C. J. M. C, PINESE, J. P. P. e TEIXEIRA, R. S. – Caracterização geotécnica do subsolo da cidade de Londrina/PR. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ouro Preto/MG. **ABGE**, 2002.

MIGUEL, Miriam Gonçalves; TEIXEIRA, Raquel Souza; PADILHA, Ana Carolina Ciriaco. Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba/SP: Editora UNIMEP, v. 12, n. 24, p. 63-74, dezembro/2005.

MITCHELL, J. K. "Fabric, structure and property relationships. **Fundamentals of soil behavior**, John Wiley & Sons, New York, p.222-252, 1976.

MITCHELL, J. K. & SITAR, N. "Engineering properties of tropical residual soils", In: *Proc. Tropical and Residual Soils*, **ASCE**, 1982.

MORETTO, C. **Dados Chorume** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por anaccpadilha@hotmail.com e, 12 nov. 2013.

MOTTA, Eduarda Queiroz; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Variações da compressibilidade e do potencial de colapso de um solo perante diferentes líquidos de inundação. **REA – Revista de Estudos Ambientais**, v. 13, n.1, p.28-41, jan./jun. 2011.

MUZILLI, O. **Análise de solos: Interpretação e recomendação de calagem e adubação para o Estado do Paraná**. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1978. 49p. (Circular IAPAR no 9).

NECKEL, ITAMAR TOMIO. **Crescimento e Morfologia de Ligas de $\text{Co}_x\text{Fe}_{100-x}$ Eletrodepositadas sobre Si(111) Tipo-n**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná-UFPR. 2008. p. 108.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 213p.

NOLLA, Antonio; ANGHINONI, Ibanor. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Vol. 6, nº1, p. 97-111, Jan/Jun. 2004.

PEDROSO, N. F. ;TEIXEIRA, R. S. Provas de carga em estacas broca preenchidas com solo-cimento plástico, executadas na camada de argila porosa da cidade de Londrina/PR. In: 4 Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica, 2000, São Paulo. SEFE IV - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica. **ABEF**. São Paulo : ABEF - Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotécnica, 2000, v. 1. p. 333-340.

POPESCU, M. E. A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils. **Engineering Geology**, Amsterdam, p. 145-163, 1986.

OLIVEIRA, C.M.G.; LOLLO, J.A. Susceptibilidade de ocorrência de colapso nos solos na área urbana de Ilha Solteira (SP). In: 10° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, **ABGE**, Ouro Preto, 2002.

REGINATTO, A. R. & FERRERO, J. C. Collapse potencial of soils and soil-water chemistry. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Moscow, Proceedings, v.2.2, p. 177-183, 1973.

ROCHA, G. C.; BARROS, O. N. F.; GUIMARÃES, M. F. – Distribuição espacial e características dos solos do Campus da Universidade Estadual de Londrina, PR. **Semina**, 12(1):21-25. Londrina/PR, 1991.

RODRIGUES, R. A. **A influência do esgoto doméstico como fluido de saturação no colapso de um solo arenoso**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, 2003.

RODRIGUES, R. A.; LOLLO, J. A. Influence of domestic sewage leakage on the collapse of tropical soils. **Bulletin for Engineering Geology and the Environment**, IAEG, v. 66, p. 215-223, may. 2007.

RODRIGUES, R. A.; JUNIOR, V. E. M.; LOLLO, J. A. Influência dos constituintes do esgoto no colapso de um solo arenoso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro/RJ, v. 15, n.1, p. 29-36, jan/mar 2010.

RODRIGUES, Roger Augusto ; VILAR, O . Análise do comportamento colapsível de um solo usando ensaios de compressão triaxial e edométricos. In: COBRAMSEG, XVI, 2012, Porto de Galinhas-PE. **ABMS**, 2012. n.544. p. 1-6.

SILVA, James Dean da. **Estudo da Colapsibilidade da Argila Porosa de Brasília pelo Fluxo de Contaminantes**. (Dissertação de Mestrado em Geotécnica). Brasília-DF: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006.

SILVA, J. R. T. **Unidade II: Atributos Diagnósticos dos Solos**. 2005. Disponível em: < <http://www.ufac.br/portal/programas-de-bolsas-estudantis/programa-de-educacao-tutorial-pet/grupos-pet/pet-agronomia-1/apoio-didatico/genese-e-morfologia-do-solo/unidade-2-atributos-diagnosticos> > Acesso em 03 maio 2014.

SOUZA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**: em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 3 ed., p. 367, 2006.

TEIXEIRA, R. S.; BELINCANTA, A.; LOPES, F. F.; GUTIERREZ, N.; BRANCO, C. J. M. C. Avaliação do colapso do solo da camada superficial da cidade de Londrina/PR. In: Solos Não Saturados, 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos – SP. **ABMS**. São Carlos: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2004. p. 495-499.

TEIXEIRA, R. S.; NEVES, H. M. G. S.; MOURA, J. C.; SOARES, C. S. Parâmetros de Compactação do solo da cidade de Londrina/PR. In: I Simpósio de Geotécnica do Centro Oeste, **CEFET MT**, Cuiabá, MT, 2003. v. 1.

TEIXEIRA, R. S.; PINESE, J. P. P. Potencial de utilização do estrato superior do solo laterítico da cidade de Londrina Estado do Paraná, como material e apoio de aterros sanitários. **Acta Scientiarum. Technology**. Maringá, PR. 2006, v.28, p.85 – 92.

TEIXEIRA, R.S.; SOBRINHO, V.R.M.; BRANCO, C.J.MdaC. Avaliação do Perfil Estratigráfico Obtido por meio de SPTs, CPTs e DMTs Executados em Solo Laterítico da Cidade de Londrina/PR. Congresso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba-PR, **ABMS**, 2006.

TEIXEIRA, R.S.; BRANCO, C.J.M da C.; SOBRINHO, V.R.M. e TEIXEIRA, S.H. C. Avaliação de parâmetros geotécnicos por meio de correlações de resultados de SPT, CPT e DMT. Congresso Brasileiro de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica, **ABMS**, Búzios-RJ,. 2008.

TEIXEIRA R.S., CAMBIER, P., DIAS, R.D., PINESE, J. P. P., JAULIN-SOUBELET, A. 2010. Mobility of potentially harmful metals in latosols impacted by the municipal solid waste deposit of Londrina, Brazil. **APPLIED GEOCHEMISTRY** **25**, 2010, p.1–15.

VARGAS, M. **Resistência e Compressibilidade de Argilas Residuais**. Tese apresentada à Congregação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para concurso à cadeira de Mecânica dos Solos e Fundações, 1951.

VARGAS, M. **Identification and classification of tropical soils**. US/BRAZIL, *Geotechnical workshop on Applicability of classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils*, 23-25 November 1992, p. 200-205.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Mc Graw-Hill do Brasil – Ed. da Universidade, São Paulo, 509 p. 1978

VESSARO, P.; BRANCO, C. J. M. C.; CINTRA, J. C. A.; AOKI, N., 2004. **Provas de carga dinâmica em estacas escavadas com trado mecânico**. In: V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotécnica, 2004, São Paulo, SP.

VILAR, O. M. **Estudo da compressão unidirecional do sedimento moderno (solo superficial) da cidade de São Carlos**. Dissertação Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, p.105, 1979.

VILAR, O.M. & MACHADO, S.L. “The Influence of Suction on Lateral Stress and on Collapse of a Non-Saturated”. **Soil and Pavement Mechanics**. Almeida eds., Balkema, Rotterdam, pp.309-314, 1997.

VILAR, O.M., MACHADO, S.L. e BUENO, B.S. “Collapse Behavior of a Compacted Lateritic Soil”. Proc. **2nd International Conference on Unsaturated Soils**. Beijing, China, Vol. 2, pp. 173-178, 1998.

WEISS, L. A., 2010. **Comparação de Métodos de Permeabilidade no Campus da UEL**. Trabalho de Conclusão de Curso, TCC, Engenharia Civil. Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 59p.

YOUNG, R. N.; MOHAMED, A. M. O. & WARKENTIN, B. P. **Principles of Contaminant Transport in Soils**. Elsevier, Amsterdam, 327p., 1992.

ANEXOS


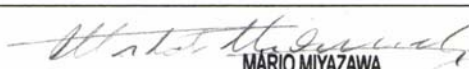
ANEXO A

Perfil do solo do poço n.º 9 do CEEG – sondagem tipo SPT.

Informações gerais		RESULTADOS DOS ENSAIOS "SPT-T"						DESCRIÇÃO DO SUBSOLO ANÁLISE VISUAL-TÁTIL						
Cotas (m) em rel. a R.N.	Avanço do furo	Revestimento	n.º de golpes pela penetração	N _{SPT}		T _{máx./mín.}	N (n.º de golpes)	T _{máx.} (kgf.m)	Prof. (m) N.A.	Posição e n.º das amostras	ANÁLISE VISUAL-TÁTIL			
				ABINT	deform.						Código	Textura	Textura do material	Descrição complementar
0,00	TH*		1 1 1	3	2,9	5	3		0					
1,00			1 1 1	1	1,4	2	1		1					
			1 1 2	3	3,0	5	3		2					
			2 2 2	4	4,0	6	4		3					
			2 2 2	4	3,9	6	4		4					
			2 2 3	5	5,0	7	5		5					
			2 2 2	4	4,0	6	4		6					
			2 2 3	6	6,0	8	6		7					
			3 4 4	8	8,0	10	8		8					
			4 4 5	9	9,0	12	10		9					
			5 6 6	12	12,0	15	13		10					
			4 4 6	10	10,0	12	10		11					
			4 5 10	15	15,0	18	16		12					
			4 5 9	14	14,0	17	15		13					
			9 11 13	24	24,0	27	25		14					
									15					
									16					
									17					
									18					
									19					
									20					
									21					
									22					
									23					
									24					
									25					
									26					
									27					
									28					
									29					
									30					
									31					
									32					
									33					
									34					
									35					
									36					
									37					
									38					
									39					
									40					
									41					
									42					
									43					
									44					
									45					
									46					
									47					
									48					
									49					
									50					
									51					
									52					
									53					
									54					
									55					
									56					
									57					
									58					
									59					
									60					
									61					
									62					
									63					
									64					
									65					
									66					
									67					
									68					
									69					
									70					
									71					
									72					
									73					
									74					
									75					
									76					
									77					
									78					
									79					
									80					
									81					
									82					
									83					
									84					
									85					
									86					
									87					
									88					
									89					
									90					
									91					
									92					
									93					
									94					
									95					
									96					
									97					
									98					
									99					
									100					
									101					
									102					
									103					
									104					
									105					
									106					
									107					
									108					
									109					
									110					
									111					
									112					
									113					
									114					
									115					
									116					
									117					
									118					
									119					
									120					
									121					
									122					
									123					
									124					
									125					
									126					
									127					
									128					
									129					
									130					
									131					
									132					
									133					
									134					
									135					

ANEXO B

Análise química do solo inundado nos fluidos de interesse.

	INSTITUTO AGRÔNOMO DO PARANÁ RODOVIA CELSO GARCIA CID - KM 375 - TRÊS MARCOS TELEFONE: (43) 3376-2000 - FAX: (43) 3376-2101 CAIXA POSTAL: 481 - CEP 86001-970 - LONDRINA - PR - BRASIL VINCULADO A SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO http://www.iapar.br		LABORATÓRIO DE SOLOS DE: LONDRINA labsolos@iapar.br										
	RESULTADO DE ANÁLISE DE SOLO		Nº DO LAUDO 74	Nº NPS 0	DATA 06/03/2014								
SOLICITANTE: ANA CAROLINA CIRIACO PADILHA PROPRIEDADE: UEL			LOCALIDADE: MUNICÍPIO / ESTADO: LONDRINA - PR										
NÚMERO DO LABORAT.	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA Nº, LOCAL, TALHÃO, ETC.	mg / dm ³		g / dm ³	pH	cmol _c / dm ³ de solo						%	
		P	C			Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V
934	01 BÁSICO	767.5	2.49	5.50	0.14	7.20	0.35	0.20	0.10	0.65	7.85	8.28	17.72
935	02 BÁSICO	776.2	2.22	5.50	0.14	7.20	0.35	0.20	0.10	0.65	7.85	8.28	17.72
936	01 LIXIVIADO	2.5	2.41	4.40	0.07	5.34	0.90	0.74	2.50	4.14	9.48	43.67	1.66
937	02 LIXIVIADO	2.6	2.80	4.40	0.07	5.34	0.92	0.78	2.50	4.20	9.54	44.02	1.63
938	01 ÁGUA	2.8	2.02	4.50	0.20	5.34	0.57	0.16	0.07	0.80	6.14	13.02	20.00
939	02 ÁGUA	2.7	2.49	4.50	0.18	5.34	0.57	0.16	0.05	0.78	6.12	12.74	18.75
940	01 ACIDO	2313.8	1.83	5.00	1.02	10.45	0.25	0.20	0.10	0.55	11.00	5.00	64.96
941	02 ACIDO	2340.7	1.63	5.00	1.10	10.45	0.25	0.20	0.10	0.55	11.00	5.00	66.66
SB= Soma de Bases		T= Capacidade de Troca de Cátions			V= Saturação por Bases			SAI= Saturação por Alumínio					
P - K: Mehlich I		Ca - Mg - Al: KCl M			pH: CaCl ₂ 0,01 M			C= Walkley - Black					
OBS.:													
												 MÁRIO MIYAZAWA CRQ 09100120	

NESTE RESULTADO DE ANÁLISE, NÃO CONSTAM RECOMENDAÇÕES DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES.


Sendo:

Básico: solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12);

Ácido: solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4).


ANEXO C

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova na umidade natural de campo

	Universidade Estadual de Londrina		Ensaio de Adensamento				
	Laboratório de Mecânica dos Solos		MB 3336				
Classificação :	Local: CEEG						
	Poço:		Bloco: 1	C.P.: 01			
	Profundidade: 2,0m			Data de início: 10/09/2013			
	Técnico: Ana Carolina						
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		497	282	225	24	472	317
M _s +M _w +M _c	(g)	29,25	19,54	22,76	19,89	19,46	16,28
M _s +M _c	(g)	24,99	16,29	19,32	17,79	17,41	14,29
M _c	(g)	9,92	4,83	7,14	8,31	8,10	5,29
M _w	(g)	4,26	3,25	3,44	2,10	2,05	1,99
M _s	(g)	15,07	11,46	12,18	9,48	9,31	9,00
ω	(%)	28,27	28,36	28,24	22,15	22,02	22,11
ω média	(%)	28,29			22,09		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio seco desde o início			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,82				
Volume	(cm ³)	160,84	141,79				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	461,21	451,77				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	196,77	187,33				
Massa Específica do Solo	(g/cm)	1,22	1,32				
Teor de Umidade	(%)	28,29	22,09				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	0,95	1,08				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,15	1,77				
Grau de Saturação	(%)	39,55	37,38				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	24,000		32,000		2,146	1,000	
6	23,632	0,368	31,632	0,03618	2,110	0,983	
12	23,340	0,292	31,340	0,02871	2,081	0,970	
25	22,838	0,502	30,838	0,04935	2,032	0,947	
50	22,355	0,483	30,355	0,04749	1,984	0,925	
100	21,675	0,680	29,675	0,06685	1,917	0,893	
200	21,052	0,620	29,055	0,06095	1,856	0,865	
400	19,878	1,174	27,881	0,11542	1,741	0,811	
200	19,953	-0,075	27,956	-0,00737	1,748	0,815	
100	20,028	-0,075	28,031	-0,00737	1,756	0,818	
6	20,206	-0,178	28,209	-0,01750	1,773	0,826	


ANEXO D

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água desde o início

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 20/09/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		501	507	20	413	145	339
M _s +M _w +M _c	(g)	32,57	26,32	30,06	27,59	22,04	21,91
M _s +M _c	(g)	27,55	22,20	25,10	22,45	18,24	16,81
M _c	(g)	9,72	7,82	7,70	10,22	9,49	4,66
M _w	(g)	5,02	4,12	4,96	5,14	3,80	5,10
M _s	(g)	17,83	14,38	17,40	12,23	8,75	12,15
ω	(%)	28,15	28,65	28,51	42,03	43,43	41,98
ω média	(%)	28,44			42,48		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com água desde o início			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,14				
Volume	(cm ³)	160,84	107,73				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	472,75					
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	208,31	-264,44				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,30	-2,45				
Teor de Umidade	(%)	28,44	42,48				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,01	-1,72				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,98	0,99				
Grau de Saturação	(%)	43,19	128,37				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	25,165		32,000		1,975	1,000	
6	24,860	0,305	31,695	0,02836	1,947	0,986	
12	24,764	0,096	31,599	0,00893	1,938	0,981	
25	23,604	1,160	30,439	0,10785	1,830	0,927	
50	19,300	3,700	26,739	0,34400	1,486	0,752	
100	17,422	1,878	24,861	0,17460	1,311	0,664	
200	15,601	1,821	23,040	0,16930	1,142	0,578	
400	13,729	1,866	21,174	0,17349	0,969	0,490	
200	0,000	-0,029	21,203	-0,00270	0,971	0,492	
100	0,000	-0,052	21,255	-0,00483	0,976	0,494	
6	13,988	-0,178	21,433	-0,01655	0,993	0,503	
0	0,000	0,000	21,433	0,00000	0,993	0,503	
0	0,000	0,000	21,433	0,00000	0,993	0,023	


ANEXO E

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado desde o início

	Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336				
	Classificação :		Local: CEEG Poço: Bloco: 1 C.P.: 01 Profundidade: 2,0m Data de início: 16/04/2013 Técnico: Ana Carolina				
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio		Depois do ensaio			
Cápsula n°		467	506	497	57	497	273
M _s +M _w +M _c	(g)	25,49	21,97	24,80	25,26	23,74	24,65
M _s +M _c	(g)	21,27	18,32	21,18	20,34	19,81	19,14
M _c	(g)	7,71	6,73	9,92	7,72	9,92	4,63
M _w	(g)	4,22	3,65	3,62	4,92	3,93	5,51
M _s	(g)	13,56	11,59	11,26	12,62	9,89	14,51
ω	(%)	31,12	31,49	32,15	38,99	39,74	37,97
ω média	(%)	31,59		38,90			
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com lixiviado desde o início			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,22				
Volume	(cm ³)	160,84	111,51				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	465,28	475,71				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	200,84	211,27				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,25	1,89				
Teor de Umidade	(%)	31,59	38,90				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	0,95	1,36				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,16	1,19				
Grau de Saturação	(%)	43,84	97,92				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	24,912		32,000		2,161	1,000	
6	24,102	0,810	31,190	0,08003	2,081	0,963	
12	23,315	0,787	30,403	0,07775	2,004	0,927	
25	21,715	1,600	28,803	0,15807	1,846	0,854	
50	19,985	1,718	27,085	0,16973	1,676	0,775	
100	18,235	1,750	25,335	0,17289	1,503	0,695	
200	16,448	1,784	23,551	0,17625	1,327	0,614	
400	14,785	1,663	21,888	0,16430	1,162	0,538	
200	0,000	-0,049	21,937	-0,00484	1,167	0,540	
100	0,000	-0,057	21,994	-0,00563	1,173	0,543	
6	15,061	-0,190	22,184	-0,01877	1,192	0,551	


ANEXO F

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) desde o início

	Universidade Estadual de Londrina		Ensaio de Adensamento				
	Laboratório de Mecânica dos Solos		MB 3336				
Classificação :	Local: CEEG						
	Poço:		Bloco: 1	C.P.: 01			
	Profundidade: 2,0m			Data de início: 08/10/2013			
	Técnico: Ana Carolina						
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		472	453	507	161	33	225
M _s +M _w +M _c	(g)	23,22	26,44	23,49	19,71	18,44	17,00
M _s +M _c	(g)	20,71	20,86	23,32	16,30	15,78	14,67
M _c	(g)	8,06	7,28	7,82	5,18	7,21	7,14
M _w	(g)	2,51	5,58	0,17	3,41	2,66	2,33
M _s	(g)	12,65	13,58	15,50	11,12	8,57	7,53
ω	(%)	19,84	41,09	1,10	30,67	31,04	30,94
ω média	(%)	20,68			30,88		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Hexametáfosfato_básico desde o início			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,06				
Volume	(cm ³)	160,84	103,31				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	477,73	498,56				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	213,29	234,12				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,33	2,27				
Teor de Umidade	(%)	20,68	30,88				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,10	1,73				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,73	0,75				
Grau de Saturação	(%)	35,85	122,94				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
1	22,780		32,000		1,730	1,000	
6	21,078	1,702	30,298	0,14521	1,585	0,916	
12	19,138	1,932	28,366	0,16483	1,420	0,821	
25	17,279	1,849	26,517	0,15775	1,262	0,730	
50	15,281	1,887	24,630	0,16099	1,101	0,637	
100	13,652	1,627	23,003	0,13881	0,963	0,556	
200	11,978	1,674	21,329	0,14282	0,820	0,474	
400	10,720	1,255	20,074	0,10707	0,713	0,412	
200	0,000	-0,066	20,140	-0,00563	0,718	0,415	
100	0,000	-0,086	20,226	-0,00734	0,726	0,419	
6	11,200	-0,328	20,554	-0,02798	0,754	0,436	


ANEXO G

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) desde o início

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 20/02/2014			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		482	472	453	215	453	145
M _s +M _w +M _c	(g)	25,90	33,88	28,21	15,93	20,46	20,90
M _s +M _c	(g)	22,79	29,43	24,65	13,61	17,45	18,04
M _c	(g)	7,74	8,06	7,28	6,61	7,27	9,48
M _w	(g)	3,11	4,45	3,56	2,32	3,01	2,86
M _s	(g)	15,05	21,37	17,37	7,00	10,18	8,56
ω	(%)	20,66	20,82	20,50	33,14	29,57	33,41
ω média	(%)	20,66			32,04		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com hexametáfosfato_acido desde o inicio			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	1,99				
Volume	(cm ³)	160,84	99,83				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	458,75	483,11				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	194,31	218,67				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,21	2,19				
Teor de Umidade	(%)	20,66	32,04				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,00	1,66				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,00	0,86				
Grau de Saturação	(%)	31,05	111,79				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,450		32,000		1,996	1,000	
6	22,045	1,405	30,595	0,13156	1,865	0,934	
12	20,190	1,855	28,740	0,17370	1,691	0,847	
25	18,382	1,808	26,932	0,16930	1,522	0,762	
50	16,348	2,020	24,912	0,18915	1,333	0,668	
100	14,095	2,253	22,659	0,21097	1,122	0,562	
200	12,449	1,643	21,016	0,15385	0,968	0,485	
400	10,898	1,551	19,465	0,14523	0,823	0,412	
200	0,000	-0,060	19,525	-0,00562	0,828	0,415	
100	0,000	-0,064	19,589	-0,00599	0,834	0,418	
6	11,210	-0,273	19,862	-0,02556	0,860	0,431	


ANEXO H

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 25 kPa

		Universidade Estadual de Londrina		Ensaio de Adensamento			
		Laboratório de Mecânica dos Solos		MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 28/11/2012			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) :				(g)	
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		431	263	467	317	263	506
M _s +M _w +M _c	(g)	19,26	14,55	16,33	23,79	24,34	26,07
M _s +M _c	(g)	16,87	11,92	14,05	18,79	18,91	20,88
M _c	(g)	10,25	4,52	7,72	5,29	4,52	6,75
M _w	(g)	2,39	2,63	2,28	5,00	5,43	5,19
M _s	(g)	6,62	7,40	6,33	13,50	14,39	14,13
ω	(%)	36,10	35,54	36,02	37,04	37,73	36,73
ω média	(%)	35,89			37,17		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com água na carga de 25 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,43				
Volume	(cm ³)	160,84	122,03				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	486,86	486,99				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	222,42	222,55				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,38	1,82				
Teor de Umidade	(%)	35,89	37,17				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,02	1,33				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,95	1,24				
Grau de Saturação	(%)	55,27	90,17				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,440		32,000		1,948	1,000	
6	23,199	0,241	31,759	0,02220	1,926	0,989	
12	23,129	0,070	31,689	0,00645	1,919	0,985	
25	22,891	0,238	31,451	0,02193	1,897	0,974	
25	22,322	0,569	30,882	0,05242	1,845	0,947	
50	21,539	0,783	30,099	0,07213	1,773	0,910	
100	20,896	0,643	29,456	0,05924	1,714	0,880	
200	18,684	1,154	28,302	0,10631	1,607	0,825	
400	16,578	2,106	26,196	0,19402	1,413	0,726	
800	14,535	2,043	24,153	0,18821	1,225	0,629	
400	14,592	-0,057	24,210	-0,00525	1,230	0,632	
200	14,659	-0,067	24,277	-0,00617	1,237	0,635	
6	15,078	-0,419	24,696	-0,03860	1,275	0,023	


ANEXO I

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 50 kPa

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 08/01/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		205	453	317	467	431	3
M _s +M _w +M _c	(g)	19,86	26,70	19,62	24,69	27,53	21,01
M _s +M _c	(g)	16,70	22,10	16,24	20,07	22,86	17,64
M _c	(g)	6,55	7,28	5,28	7,72	10,27	8,46
M _w	(g)	3,16	4,60	3,38	4,62	4,67	3,37
M _s	(g)	10,15	14,82	10,96	12,35	12,59	9,18
ω	(%)	31,13	31,04	30,84	37,41	37,09	36,71
ω média	(%)	31,00			37,07		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com água na carga de 50 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,29				
Volume	(cm ³)	160,84	114,97				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	466,67	475,32				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	202,23	210,88				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,26	1,83				
Teor de Umidade	(%)	31,00	37,07				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	0,96	1,34				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,13	1,23				
Grau de Saturação	(%)	43,75	90,10				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	20,060		32,000		2,126	1,000	
6	20,022	0,038	31,962	0,00371	2,122	0,998	
12	20,000	0,022	31,940	0,00215	2,120	0,997	
25	19,845	0,155	31,785	0,01514	2,105	0,990	
50	19,568	0,277	31,508	0,02706	2,078	0,977	
50	17,415	2,153	29,355	0,21031	1,867	0,878	
100	16,198	1,217	28,138	0,11888	1,749	0,823	
200	14,339	1,761	26,377	0,17202	1,577	0,742	
400	12,405	1,934	24,443	0,18892	1,388	0,653	
800	10,448	1,697	22,746	0,16577	1,222	0,575	
400	10,508	-0,060	22,806	-0,00586	1,228	0,578	
200	10,575	-0,067	22,873	-0,00654	1,234	0,581	
6	10,976	-0,401	23,274	-0,03917	1,273	0,599	


ANEXO J

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com água na tensão de 100 kPa

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 24/01/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		507	196	496	467	507	496
M _s +M _w +M _c	(g)	20,78	15,79	17,50	29,60	29,18	24,10
M _s +M _c	(g)	17,69	13,19	15,11	23,69	22,87	19,63
M _c	(g)	7,81	4,93	7,51	7,72	7,81	7,51
M _w	(g)	3,09	2,60	2,39	5,91	6,31	4,47
M _s	(g)	9,88	8,26	7,60	15,97	15,06	12,12
ω	(%)	31,28	31,48	31,45	37,01	41,90	36,88
ω média	(%)	31,40			38,60		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com água na carga de 100 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,16				
Volume	(cm ³)	160,84	108,60				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	476,51	484,72				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	212,07	220,28				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,32	2,03				
Teor de Umidade	(%)	31,40	38,60				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,00	1,46				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,99	1,02				
Grau de Saturação	(%)	47,34	113,67				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	22,070		32,000		1,990	1,000	
6	21,988	0,082	31,918	0,00766	1,982	0,996	
12	21,681	0,307	31,611	0,02868	1,953	0,982	
25	21,058	0,623	30,988	0,05821	1,895	0,952	
50	20,249	0,809	30,179	0,07559	1,820	0,914	
100	18,908	1,341	28,838	0,12529	1,694	0,852	
100	17,622	1,286	27,552	0,12015	1,574	0,791	
200	15,559	2,011	25,541	0,18789	1,386	0,697	
400	13,362	2,197	23,344	0,20527	1,181	0,594	
800	11,372	1,888	21,456	0,17640	1,005	0,505	
400	11,448	-0,076	21,532	-0,00710	1,012	0,508	
200	11,521	-0,073	21,605	-0,00682	1,019	0,512	
6	11,795	-0,274	21,879	-0,02560	1,044	0,525	


ANEXO K

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 25 kPa

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:		Bloco: 1	C.P.: 01		
		Profundidade: 2,0m			Data de início: 08/05/2013		
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) :					(g)
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		506	279	401	59	260	140
M _s +M _w +M _c	(g)	20,46	16,85	24,88	30,57	21,20	20,50
M _s +M _c	(g)	17,26	13,96	21,36	24,32	16,80	16,53
M _c	(g)	6,72	4,66	10,11	7,74	5,20	5,85
M _w	(g)	3,20	2,89	3,52	6,25	4,40	3,97
M _s	(g)	10,54	9,30	11,25	16,58	11,60	10,68
ω	(%)	30,36	31,08	31,29	37,70	37,93	37,17
ω _{média}	(%)	30,91			37,60		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com lixiviado na carga de 25 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,33				
Volume	(cm ³)	160,84	117,19				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	483,88	490,52				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	219,44	226,08				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,36	1,93				
Teor de Umidade	(%)	30,91	37,60				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,04	1,40				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,88	1,10				
Grau de Saturação	(%)	49,36	102,80				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,671		32,000		1,879	1,000	
6	23,445	0,226	31,774	0,02033	1,858	0,989	
12	23,300	0,145	31,629	0,01304	1,845	0,982	
25	22,938	0,362	31,267	0,03256	1,813	0,965	
25	21,892	1,041	30,226	0,09364	1,719	0,915	
50	20,778	1,114	29,112	0,10021	1,619	0,862	
100	19,160	1,614	27,498	0,14519	1,474	0,784	
200	16,719	2,439	25,059	0,21940	1,254	0,668	
400	14,695	2,024	23,035	0,18207	1,072	0,571	
200	0,000	-0,045	23,080	-0,00405	1,076	0,573	
100	14,792	-0,052	23,132	-0,00468	1,081	0,575	
6	14,962	-0,183	23,315	-0,01646	1,097	0,584	


ANEXO L

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 50 kPa

		Universidade Estadual de Londrina		Ensaio de Adensamento			
		Laboratório de Mecânica dos Solos		MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 04/03/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) :				(g)	
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		260	197	275	57	59	507
M _s +M _w +M _c	(g)	19,26	18,01	17,76	27,11	32,03	24,57
M _s +M _c	(g)	16,08	15,09	14,81	21,70	25,31	19,81
M _c	(g)	5,20	5,28	4,80	7,72	7,74	7,82
M _w	(g)	3,18	2,92	2,95	5,41	6,72	4,76
M _s	(g)	10,88	9,81	10,01	13,98	17,57	11,99
ω	(%)	29,23	29,77	29,47	38,70	38,25	39,70
ω média	(%)	29,49			38,88		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Lixiviado na carga de 50 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,34				
Volume	(cm ³)	160,84	117,85				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	496,33	509,12				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	231,89	244,68				
Massa Específica do Solo	(g/cm)	1,44	2,08				
Teor de Umidade	(%)	29,49	38,88				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,11	1,49				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,69	0,97				
Grau de Saturação	(%)	52,21	119,72				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	24,880		32,000		1,694	1,000	
6	24,542	0,338	31,662	0,02846	1,666	0,983	
12	24,269	0,273	31,389	0,02299	1,643	0,970	
25	23,931	0,338	31,051	0,02846	1,615	0,953	
50	23,549	0,382	30,669	0,03217	1,582	0,934	
50	21,635	1,914	28,755	0,16116	1,421	0,839	
100	19,891	1,721	27,034	0,14491	1,276	0,753	
200	17,929	1,962	25,072	0,16521	1,111	0,656	
400	16,019	1,901	23,171	0,16007	0,951	0,561	
200	0,000	-0,050	23,221	-0,00421	0,955	0,564	
100	16,121	-0,052	23,273	-0,00438	0,960	0,566	
6	16,279	-0,174	23,447	-0,01465	0,974	0,575	
0	0,000	0,000	23,447	0,00000	0,974	0,575	


ANEXO M

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com Lixiviado na tensão de 100 kPa

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 21/03/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		467	506	497	467	506	497
M _s +M _w +M _c	(g)	29,92	24,89	27,10	28,65	28,44	32,93
M _s +M _c	(g)	24,52	20,40	23,01	22,61	22,18	26,31
M _c	(g)	7,71	6,73	9,92	7,71	6,73	9,92
M _w	(g)	5,40	4,49	4,09	6,04	6,26	6,62
M _s	(g)	16,81	13,67	13,09	14,90	15,45	16,39
ω	(%)	32,12	32,85	31,25	40,54	40,52	40,39
ω média	(%)	32,07			40,48		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Lixiviado na carga de 100 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,26				
Volume	(cm ³)	160,84	113,66				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	482,56	495,56				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	218,12	231,12				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,36	2,03				
Teor de Umidade	(%)	32,07	40,48				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,03	1,45				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,92	1,06				
Grau de Saturação	(%)	50,07	114,07				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	24,985		32,000		1,922	1,000	
6	24,898	0,087	31,913	0,00794	1,914	0,996	
12	24,749	0,149	31,764	0,01360	1,900	0,989	
25	24,372	0,377	31,387	0,03442	1,866	0,971	
50	23,952	0,420	30,967	0,03835	1,827	0,951	
100	22,975	0,977	29,990	0,08920	1,738	0,905	
100	19,375	3,600	26,390	0,32870	1,410	0,733	
200	17,262	2,110	24,280	0,19265	1,217	0,633	
400	15,322	1,940	22,340	0,17713	1,040	0,541	
200	0,000	-0,022	22,362	-0,00201	1,042	0,542	
100	15,399	-0,055	22,417	-0,00502	1,047	0,545	
6	15,575	-0,196	22,613	-0,01790	1,065	0,554	
0	0,000	0,000	22,613	0,00000	1,065	0,554	


ANEXO N

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 25 kPa.

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 09/12/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		506	497	185	497	453	506
M _s +M _w +M _c	(g)	30,42	29,59	33,21	24,42	23,65	17,48
M _s +M _c	(g)	26,71	26,48	29,16	20,82	19,47	14,67
M _c	(g)	6,73	9,92	7,71	9,92	7,27	6,73
M _w	(g)	3,71	3,11	4,05	3,60	4,18	2,81
M _s	(g)	19,98	16,56	21,45	10,90	12,20	7,94
ω	(%)	18,57	18,78	18,88	33,03	34,26	35,39
ω média	(%)	18,74			34,23		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Hexametáfosfato_básico na carga de 25 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,08				
Volume	(cm ³)	160,84	104,71				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	460,19	482,30				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	195,75	217,86				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,22	2,08				
Teor de Umidade	(%)	18,74	34,23				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,02	1,55				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,93	0,91				
Grau de Saturação	(%)	29,18	113,39				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,180		32,000		1,927	1,000	
6	22,996	0,184	31,816	0,01683	1,910	0,991	
12	22,822	0,174	31,642	0,01592	1,894	0,983	
25	22,608	0,214	31,428	0,01957	1,875	0,973	
25	18,631	3,977	27,451	0,36378	1,511	0,784	
50	17,010	1,611	25,840	0,14736	1,364	0,708	
100	14,601	2,409	23,431	0,22035	1,143	0,593	
200	13,035	1,564	21,867	0,14306	1,000	0,519	
400	11,568	1,467	20,400	0,13419	0,866	0,449	
200	11,619	-0,051	20,451	-0,00467	0,871	0,452	
100	11,678	-0,059	20,510	-0,00540	0,876	0,455	
6	12,000	-0,322	20,832	-0,02945	0,906	0,470	


ANEXO O

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 50 kPa.

	Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos	Ensaio de Adensamento MB 3336					
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 28/10/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
<i>Cápsula n°</i>		185	215	145	453	497	506
M _s +M _w +M _c	(g)	35,08	24,88	23,77	26,20	26,59	25,04
M _s +M _c	(g)	30,43	21,51	20,55	21,52	22,48	20,53
M _c	(g)	7,71	4,81	4,51	7,27	9,92	6,73
M _w	(g)	4,65	3,37	3,22	4,68	4,11	4,51
M _s	(g)	22,72	16,70	16,04	14,25	12,56	13,80
ω	(%)	20,47	20,18	20,07	32,84	32,72	32,68
ω média	(%)	20,24			32,75		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Hexametáfosfato_básico na carga de 50 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,09				
Volume	(cm ³)	160,84	104,92				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	463,51	495,76				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	199,07	231,32				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,24	2,20				
Teor de Umidade	(%)	20,24	32,75				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,03	1,66				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		1,91	0,90				
Grau de Saturação	(%)	31,72	109,02				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,860		32,000		1,915	1,000	
6	23,698	0,162	31,838	0,01475	1,900	0,992	
12	23,619	0,079	31,759	0,00720	1,893	0,989	
25	23,485	0,134	31,625	0,01220	1,880	0,982	
50	23,298	0,187	31,438	0,01703	1,863	0,973	
50	18,458	4,840	26,598	0,44083	1,423	0,743	
100	16,130	2,324	24,274	0,21167	1,211	0,632	
200	14,300	1,830	22,444	0,16668	1,044	0,545	
400	12,402	1,898	20,546	0,17287	0,871	0,455	
200	0,000	-0,053	20,599	-0,00483	0,876	0,458	
100	12,511	-0,056	20,655	-0,00510	0,881	0,460	
6	12,730	-0,219	20,874	-0,01995	0,901	0,471	
0	0,000	0,000	20,874	0,00000	0,901	0,471	


ANEXO P

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de hidróxido de sódio com hexametáfosfato de sódio (pH=12) na tensão de 100 kPa.

	Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos	Ensaio de Adensamento					
		MB 3336					
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 21/03/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
<i>Cápsula n°</i>		504	23	482	185	167	285
M _s +M _w +M _c	(g)	25,16	30,43	26,52	21,78	14,92	16,93
M _s +M _c	(g)	22,11	26,87	23,22	18,50	12,53	14,63
M _c	(g)	7,58	9,20	7,75	7,72	5,17	7,15
M _w	(g)	3,05	3,56	3,30	3,28	2,39	2,30
M _s	(g)	14,53	17,67	15,47	10,78	7,36	7,48
ω	(%)	20,99	20,15	21,33	30,43	32,47	30,75
ω média	(%)	20,82			31,22		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com hexametáfosfato básico na carga de 100 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	2,06				
Volume	(cm ³)	160,84	103,70				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	459,05	477,94				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	194,61	213,50				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,21	2,06				
Teor de Umidade	(%)	20,82	31,22				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,00	1,57				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,00	0,93				
Grau de Saturação	(%)	31,30	100,54				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,415		32,000		1,996	1,000	
6	23,340	0,075	31,925	0,00702	1,989	0,996	
12	23,250	0,090	31,835	0,00843	1,980	0,992	
25	23,135	0,115	31,720	0,01077	1,970	0,987	
50	22,869	0,266	31,454	0,02490	1,945	0,974	
100	22,510	0,359	31,095	0,03361	1,911	0,958	
100	16,220	6,290	24,805	0,58886	1,322	0,662	
200	13,820	2,386	22,419	0,22337	1,099	0,551	
400	11,732	2,088	20,331	0,19548	0,903	0,453	
200	0,000	0,012	20,319	0,00112	0,902	0,452	
100	11,840	-0,120	20,439	-0,01123	0,913	0,458	
6	12,032	-0,192	20,631	-0,01797	0,931	0,467	


ANEXO Q

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 25 kPa.

		Universidade Estadual de Londrina		Ensaio de Adensamento			
		Laboratório de Mecânica dos Solos		MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 27/02/2014			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) :				(g)	
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		186	185	180	215	453	145
M _s +M _w +M _c	(g)	36,57	35,16	28,20	25,95	27,04	27,33
M _s +M _c	(g)	31,79	30,47	24,12	21,14	21,96	22,82
M _c	(g)	9,21	7,71	4,77	6,61	7,27	9,48
M _w	(g)	4,78	4,69	4,08	4,81	5,08	4,51
M _s	(g)	22,58	22,76	19,35	14,53	14,69	13,34
ω	(%)	21,17	20,61	21,09	33,10	34,58	33,81
ω média	(%)	20,95			33,83		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com Hexametáfosfato_ácido na carga de 25 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	1,76				
Volume	(cm ³)	160,84	88,30				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	459,23	481,89				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	194,79	217,45				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,21	2,46				
Teor de Umidade	(%)	20,95	33,83				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,00	1,84				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,00	0,64				
Grau de Saturação	(%)	31,49	157,39				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	24,458		32,000		1,996	1,000	
6	24,369	0,089	31,911	0,00833	1,988	0,996	
12	24,256	0,113	31,798	0,01058	1,977	0,991	
25	24,080	0,176	31,622	0,01648	1,961	0,982	
25	19,505	4,575	27,047	0,42837	1,533	0,768	
50	17,382	2,123	24,924	0,19878	1,334	0,668	
100	13,100	4,282	20,642	0,40094	0,933	0,467	
200	11,405	1,695	18,947	0,15871	0,774	0,388	
400	9,750	1,655	17,292	0,15496	0,619	0,310	
200	0,000	-0,090	17,382	-0,00843	0,628	0,314	
100	9,860	-0,020	17,402	-0,00187	0,629	0,315	
6	10,025	-0,165	17,567	-0,01545	0,645	0,323	


ANEXO R

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 50 kPa.

		Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos		Ensaio de Adensamento MB 3336			
Classificação :		Local: CEEG					
		Poço:	Bloco: 1	C.P.: 01			
		Profundidade: 2,0m		Data de início: 07/11/2013			
		Técnico: Ana Carolina					
Ensaio de Adensamento							
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)					
Teor de Umidade		Antes do Ensaio			Depois do ensaio		
Cápsula n°		180	57	22	145	215	453
M _s +M _w +M _c	(g)	26,55	37,40	30,85	28,29	21,04	25,55
M _s +M _c	(g)	22,85	32,40	26,84	23,52	17,29	20,84
M _c	(g)	4,08	7,73	7,19	9,48	6,61	7,27
M _w	(g)	3,70	5,00	4,01	4,77	3,75	4,71
M _s	(g)	18,77	24,67	19,65	14,04	10,68	13,57
ω	(%)	19,71	20,27	20,41	33,97	35,11	34,71
ω média	(%)	20,13			34,60		
Características Gerais		Antes	Depois	Obs: Ensaio inundado com hexametáfosfato_ácido na carga de 50 KPa.			
Diâmetro	(cm)	8,00	8,00				
Área	(cm ²)	50,26	50,26				
Altura	(cm)	3,20	1,98				
Volume	(cm ³)	160,84	99,28				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	455,74	483,32				
Tara do Anel	(g)	264,44	264,44				
Massa do C.P	(g)	191,30	218,88				
Massa Específica do Solo	(g/cm)	1,19	2,20				
Teor de Umidade	(%)	20,13	34,60				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	0,99	1,64				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00	3,00				
Índice de Vazios (e)		2,03	0,87				
Grau de Saturação	(%)	29,75	119,26				
Resultado do Ensaio							
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0	
0	23,960		32,000		2,030	1,000	
6	23,750	0,210	31,790	0,01989	2,010	0,990	
12	23,610	0,140	31,650	0,01326	1,997	0,984	
25	23,452	0,158	31,492	0,01496	1,982	0,976	
50	23,170	0,282	31,210	0,02670	1,955	0,963	
50	17,618	5,552	25,658	0,52573	1,430	0,704	
100	15,569	2,049	23,609	0,19402	1,236	0,609	
200	13,335	2,234	21,375	0,21154	1,024	0,504	
400	11,458	1,877	19,498	0,17774	0,846	0,417	
200	0,000	-0,046	19,544	-0,00436	0,851	0,419	
100	11,549	-0,045	19,589	-0,00426	0,855	0,421	
6	11,682	-0,163	19,752	-0,01543	0,870	0,429	
0	0,000	0,000	19,752	0,00000	0,870	0,429	

ANEXO S

Dados do ensaio de avaliação de colapso para o corpo de prova embebido com a solução de ácido fosfórico com hexametáfosfato de sódio (pH=2,4) na tensão de 100 kPa.

	Universidade Estadual de Londrina Laboratório de Mecânica dos Solos	Ensaio de Adensamento MB 3336				
Classificação :		Local: CEEG Poço: Bloco: 1 C.P.: 01 Profundidade: 2,0m Data de início: 01/10/2013 Técnico: Ana Carolina				
Ensaio de Adensamento						
Prensa	Anel:	Tara (Disco + Pedra Porosa) : (g)				
Teor de Umidade		Antes do Ensaio Depois do ensaio				
<i>Cápsula n°</i>		507 410 33 185 167 285				
M _s +M _w +M _c	(g)	24,85 30,19 30,35 22,08 20,81 18,47				
M _s +M _c	(g)	21,15 25,67 25,35 18,38 16,81 15,57				
M _c	(g)	7,83 9,32 7,20 7,72 5,17 7,15				
M _w	(g)	3,70 4,52 5,00 3,70 4,00 2,90				
M _s	(g)	13,32 16,35 18,15 10,66 11,64 8,42				
ω	(%)	27,78 27,65 27,55 34,71 34,36 34,44				
ω média	(%)	27,66 34,51				
Características Gerais		Antes Depois				
Diâmetro	(cm)	8,00 8,00				
Área	(cm ²)	50,26 50,26				
Altura	(cm)	3,20 2,18				
Volume	(cm ³)	160,84 109,76				
Massa (C.P. + Anel)	(g)	471,83 492,91				
Tara do Anel	(g)	264,44 264,44				
Massa do C.P	(g)	207,39 228,47				
Massa Específica do Solo	(g/cm ³)	1,29 2,08				
Teor de Umidade	(%)	27,66 34,51				
Massa Específica Seca	(g/cm ³)	1,01 1,55				
Massa Espec. dos Sólidos	(g/cm ³)	3,00 3,00				
Índice de Vazios (e)		1,97 1,03				
Grau de Saturação	(%)	42,11 100,81				
Resultado do Ensaio						
Δσ (kPa)	Extensômetro (mm)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e	ei/e0
0	23,520		32,000		1,970	1,000
6	23,370	0,150	31,850	0,01392	1,956	0,993
12	23,264	0,106	31,744	0,00984	1,946	0,988
25	22,715	0,549	31,195	0,05096	1,895	0,962
50	21,781	0,934	30,261	0,08669	1,809	0,918
100	21,620	0,158	30,103	0,01467	1,794	0,911
100	15,732	5,888	24,215	0,54652	1,248	0,633
200	14,331	1,401	22,814	0,13004	1,118	0,567
400	13,048	1,282	21,532	0,11899	0,999	0,507
200	0,000	-0,054	21,586	-0,00501	1,004	0,509
100	13,164	-0,062	21,648	-0,00575	1,009	0,512
6	13,352	-0,188	21,836	-0,01745	1,027	0,521
0	0,000	0,000	21,836	0,00000	1,027	0,521