



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOS PARA UM ATERRO SOBRE
SOLO MOLE, A PARTIR DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO
OBTIDOS EM ENSAIOS OEDOMÉTRICOS E DE PIEZOCONE**

Caruaru

2018

MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOS PARA UM ATERRO SOBRE
SOLO MOLE, A PARTIR DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO
OBTIDOS EM ENSAIOS OEDOMÉTRICOS E DE PIEZOCONE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade
Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito
para a disciplina Trabalho de Conclusão de
Curso II.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador (a): Prof(a). Dr(a). Maria Isabela
Marques da Cunha Vieira Bello.

Caruaru

2018

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Marcela Porfírio - CRB/4 - 1878

S237d Santos, Maria Mariana Azevedo dos.
Dimensionamento de geodrenos para um aterro sobre solo mole a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométricos e de piezocone. / Maria Mariana Azevedo dos Santos. – 2018.
57f. ; il. : 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia de solos. 2. Mecânica do solo. 3. Aterros. I. Bello, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-283)

MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOES PARA UM ATERRO SOBRE SOLO MOLE, A PARTIR DE COEFICIENTES DE ADENSAMENTO OBTIDOS EM ENSAIOS OEDOMÉTRICOS E DE PIEZOCONE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Geotecnia

A banca composta pelos professores abaixo, considera a aluna MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS APROVADA COM NOTA .

Caruaru, 13 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:

Profª. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Profª. Dra. Leila Brunet de Sá Bezerra _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Engenheiro Civil Me. Yago Ryan Pinheiro dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças nessa longa caminhada, mesmo com todas as dificuldades não me deixou desistir e me permitiu alcançar esse sonho.

Aos meus pais, Ednelson e Gorette que são meu porto seguro, nunca me deixaram desanimar, e sempre me apoiaram em tudo, mesmo quando eu quis mudar de curso e ir morar em outra cidade. Todas as vezes em que eu me encontrava angustiada e aflita eles sempre tinham palavras de conforto.

Aos meus irmãos, Juliana e Vitor, por todo amor, apoio e por terem sempre acreditado em mim, a minha cunhada Raysa e aos meus sobrinhos Leticia e Mateus.

Aos amigos que conheci em Caruaru e que tornaram essa caminhada menos árdua, em especial a Rayanne, Halan, Gisele, Alice, Manuelle, Rebeca e Yago.

A Ceça por ser como uma segunda mãe para mim, por todo amor e apoio e ao seu filho Cayo por toda a ajuda e por sempre acreditar no meu potencial.

A minha orientadora, Prof.^a. Dr^a. Isabela Bello, por toda atenção, experiência compartilhada, suporte e incentivo.

A Prof.^a Dr^a. Leila pela atenção e disposição em ajudar.

A TDM Brasil e Maccaferri por disponibilizar material sobre geodrenos.

E por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Existem várias soluções que permitem a utilização das áreas de solo mole. A escolha de uma delas dependerá de inúmeros fatores, como as condições do solo, o nível de recalque aceitável, o espaço disponível, além de custos e prazos de execução. Uma das técnicas mais utilizadas para acelerar o processo de adensamento em solos moles é a aplicação de drenos verticais. Trata-se de uma técnica consagrada mundialmente para melhoramento de solos compressíveis, pois promove a aceleração dos recalques por meio da perda de água, reduzindo o volume de vazios, aumentando a resistência ao cisalhamento e melhorando sua capacidade de suporte. O presente trabalho consiste no dimensionamento de geodrenos para um aterro de solo mole em Suape/PE, localizado no Complexo Industrial Portuário de Suape, estudado por Bello (2010), a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométrico e de piezocone. No perfil estudado, considerou-se 3 trechos para o dimensionamento. Foram definidas as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento) e determinada as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetro equivalente, diâmetro de influência, diâmetro da área amolgada). Foram comparados os valores de espaçamento entre os geodrenos considerando a média dos coeficientes de adensamento obtidos no ensaio de piezocone e o oedométrico. Também foram comparados, para cada trecho, o tempo de adensamento na situação com e sem o uso de geodrenos. Os resultados do dimensionamento dos geodrenos demonstram que para o trecho 2 e 3 os valores de espaçamento encontrados nos ensaios oedométricos e de piezocone foram semelhantes, variando em torno de 2,5m. Os geodrenos se mostraram mais eficazes quanto maior o valor do coeficiente de permeabilidade horizontal, aumentando o espaçamento entre os drenos, e consequentemente reduzindo o número de drenos necessários para obtenção do resultado desejado. Quanto ao tempo de adensamento, os resultados mostram que a vantagem na utilização de geodrenos, em termos de tempo para obtenção do grau de adensamento pretendido, foi diretamente proporcional à espessura da camada, quanto mais espessa a camada maior o ganho de tempo adquirido com a utilização dos geodrenos. Em relação aos valores encontrados para cada ensaio, pode-se perceber que os valores para o tempo de adensamento sem utilização de drenos foram muito maiores para o ensaio oedométrico do que para o ensaio de piezocone. Quanto menor o coeficiente de adensamento vertical maior será a vantagem em termos de tempo de adensamento na utilização de drenos verticais.

Palavras-chave: Geodrenos. Solo mole. Adensamento. Ensaio oedométrico. Ensaio de piezocone

ABSTRACT

There are several solutions that allow the use of soft soil areas. The choice of one of them will depend on a number of factors, such as soil conditions, the acceptable level of settlements, available space, and costs and lead times. One of the techniques most used to accelerate the consolidation process in soft soils is the application of vertical drains. It is a world-renowned technique for the improvement of compressible soils, as it promotes the acceleration of the settlements through the loss of water, reducing the volume of voids, increasing the shear strength and improving its support capacity. The present work consists of the geodrains dimensioning for a soft soil embankment in Suape / PE, located in the Suape Port Industrial Complex, studied by Bello (2011), using densification coefficients obtained in oedometric and piezocone tests. In the subsoil profile, 3 sections were considered for the dimensioning. The project needs (depth of drains, time and degree of densification) were determined and the geometric quantities of the geodrains were determined (equivalent diameter, influence diameter, diameter of the dented area). The values of spacing between the geodrains were compared considering the average of the coefficients of densification obtained in the piezocone and oedometric tests. We also compared, for each section, the time of densification in the situation with and without the use of geodrains. The results of the geodrains dimensioning show that for sections 2 and 3 the spacing values found in the oedometric and piezocone tests were similar, varying around 2.5m. The geodrains proved to be more effective as the horizontal permeability coefficient increased, increasing the spacing between the drains, and consequently reducing the number of drains needed to obtain the desired result. As for the time of densification, the results show that the advantage in the use of geodrains, in terms of the time to obtain the desired degree of density, was directly proportional to the thickness of the layer, the thicker the layer the greater the gain of time acquired with the use of geodrains. In relation to the values found for each test, it can be seen that the values for the densification time without the use of drains were much higher for the oedometric test than for the piezocone test. The lower the coefficient of vertical densification the greater the advantage in terms of the time of densification in the use of vertical drains.

Key-words: Geodrains. Soft soil. Consolidation process. Oedometric test. Piezocone test

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
MB	Método Brasileiro
AE	Área de Estudo

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Pressão transmitida pela fundação	18
Equação 2 – Pressão transmitida pela fundação para uma fase intermediária qualquer	18
Equação 3 – Equação fundamental do adensamento	19
Equação 4 – Coeficiente de adensamento vertical	20
Equação 5 – Coeficiente de compressibilidade	20
Equação 6 – Coeficiente de variação volumétrica.....	20
Equação 7 – Teoria do adensamento de Terzaghi	20
Equação 8 – Fator Tempo.....	20
Equação 9 – Adensamento combinado tridimensional.....	21
Equação 10 – Coeficiente de adensamento horizontal	21
Equação 11 – Grau de adensamento.....	21
Equação 12 – Deformação final	21
Equação 13 – Deformação num instante qualquer	22
Equação 14 – Grau de adensamento em função do índice de vazios	22
Equação 15 – Grau de adensamento médio.....	22
Equação 16 – Fator tempo de drenagem vertical para um adensamento menor ou igual a 60%	22
Equação 17 – Fator tempo de drenagem vertical para um adensamento maior que 60%	22
Equação 18 – Fator tempo estimado por Housby e Teh.....	23
Equação 19 – Equação reformulada para coeficiente de adensamento vertical	26
Equação 20 – Coeficiente de adensamento vertical pelo método de Casagrande	28
Equação 21 – Coeficiente de adensamento vertical pelo método de Taylor.....	29
Equação 22 – Drenagem radial pura.....	30
Equação 23 – Grau de adensamento médio da camada.....	30
Equação 24 – Fator tempo para adensamento horizontal	30
Equação 25 – Função de densidade de drenos	30
Equação 26 – Relação entre diâmetro de influência e diâmetro equivalente	30
Equação 27 – Grau de adensamento combinado	31
Equação 28 – Relação entre coeficiente de adensamento vertical e horizontal	31
Equação 29 – Coeficiente de adensamento horizontal na faixa normalmente adensada.....	36

Equação 30 – Diâmetro de influência.....	38
Equação 31 – Diâmetro equivalente do dreno.....	39
Equação 32 – Amolgamento do solo.....	40
Equação 33 – Relação entre permeabilidade horizontal do solo e da área afetada pelo amolgamento	40
Equação 34 – Fator tempo para adensamento horizontal em função da densidade de drenos .	41
Equação 35 – Tempo para obtenção do adensamento desejado.....	41
Equação 36 – Tempo para situação sem uso de drenos.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil do solo sob a sapata	17
Figura 2 – Analogia mecânica para o processo de adensamento	18
Figura 3 – Exemplo de cálculo de c_h - ensaio de dissipação na Barra da Tijuca (RJ)	25
Figura 4 – Ábaco para obtenção de c_h por meio de t_{50}	25
Figura 5 – Determinação de c_v pelo método de Casagrande	27
Figura 6 – Determinação de c_v pelo método de Taylor	28
Figura 7 – Analogia mecânica para o processo de adensamento.	30
Figura 8 – Geodreno	33
Figura 9 – Instalação dos geodrenos.....	33
Figura 10 – Vista Geral Acesso à área de estudo AE-1 - Investigação Geotécnica	35
Figura 11 – Perfil Geotécnico da área de estudo AE-1	36
Figura 12 – Malha de drenos triangular	39
Figura 13 – Diâmetro equivalente do geodreno	39
Figura 14 – Curva de adensamento (porcentagem de recalque em função do fator tempo)	42
Figura 15 – Planilha de dimensionamento para o ensaio de piezocone	43
Figura 16 – Planilha de dimensionamento para o ensaio oedométrico.	44
Figura 17 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 1 obtidos do ensaio de piezocone	45
Figura 18 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 2 obtidos do ensaio de piezocone	46
Figura 19 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 3 obtidos do ensaio de piezocone	46
Figura 20 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 1 obtidos do ensaio oedométrico	47
Figura 21 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 2 obtidos do ensaio oedométrico	47
Figura 22 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 3 obtidos do ensaio oedométrico	48
Figura 23 – Coeficiente de adensamento horizontal versus espaçamento entre os drenos	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator tempo T* em função da porcentagem de dissipação da poropressão (U)	24
Tabela 2 – Roteiro para dimensionamento dos geodrenos	34
Tabela 3 – Resultados de c_v e c_h obtidos do ensaio de adensamento oedométrico.....	37
Tabela 4 – Resultados de c_v e c_h obtidos do ensaio de piezocone	38
Tabela 5 – Valores médios de c_h e c_v para o ensaio oedométrico e de piezocone.....	48
Tabela 6 – Valores obtidos para d_m , d_w , d_s e F_s	49
Tabela 7 – Estimativa inicial e final de espaçamento entre os drenos, para o ensaio de piezocone	50
Tabela 8 – Estimativa inicial e final de espaçamento entre os drenos, para o ensaio oedométrico	50
Tabela 9 – Comparaçāo de resultados obtidos do ensaio de piezocone e ensaio oedométrico	50
Tabela 10 – Comparaçāo do tempo de adensamento com e sem uso de geodrenos.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Comentários Iniciais	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Motivação	15
1.4	Objetivos	15
1.4.1	Objetivo geral	15
1.4.2	Objetivos específicos	15
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	O Adensamento de Argilas Saturadas	17
2.2	Analogia Mecânica de Terzaghi	18
2.3	Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi	19
2.3.1	Hipóteses Simplificadoras	19
2.3.2	Equação do Adensamento	19
2.3.3	Grau de Adensamento	21
2.4	Ensaio de Piezocone	22
2.5	Ensaio de Adensamento Oedométrico	26
2.5.1	Método de Casagrande	26
2.5.2	Método de Taylor	28
2.6	Drenos Verticais	29
2.6.1	Geodrenos	29
2.6.2	Adensamento com Drenagem Puramente Radial	30
2.6.3	Adensamento com Drenagem Combinada Radial e Vertical	31
2.6.4	Parâmetros necessários ao dimensionamento de geodrenos	31
2.6.5	Especificação dos Geodrenos	32
2.7.6	Principais Utilizações dos Geodrenos	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Considerações Iniciais	34
3.2	Área de Estudo	35
3.3	Dimensionamento de Geodrenos	38
3.3.1	Diâmetro de Influência e espaçamento	38

3.3.2	Diâmetro equivalente dos geodrenos	39
3.3.3	Influência do amolgamento na instalação do dreno.....	40
3.3.4	Roteiro de Dimensionamento.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Coeficiente de Adensamento Médio	45
4.1.1	Ensaio de Piezocone	45
4.1.2	Ensaio Oedométrico	47
4.2	Grandezas relacionadas ao Geodreno.....	48
4.3	Diâmetro de influência e espaçamento entre os drenos.....	49
4.3.1	Ensaio de Piezocone	49
4.3.2	Ensaio Oedométrico	50
4.4	Espaçamento entre os drenos: Comparação entre dados obtidos por Piezocone e Oedométrico	50
4.5	Comparação do Tempo de Adensamento com e sem uso de geodrenos	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Sugestões para Futuras Pesquisas	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Iniciais

A rápida expansão da cidade nas últimas décadas tem provocado escassez de locais com melhor capacidade de suporte, resultando nas frequentes construções sobre depósitos de solos moles. Devido à alta compressibilidade e baixa resistência, a presença destes depósitos é motivo de preocupação nas obras de engenharia, reduzindo a área de instalação de estruturas civis, como fundações, estradas e grandes edificações (BELLO, 2011).

Esse processo faz surgir a necessidade de conhecer as propriedades mecânicas dos depósitos de argila mole, a fim de estudar técnicas de melhoramento que permitam a construção nesse tipo de solo, que são evitados devido às suas características pouco propícias para fundação.

Existem várias soluções que permitem a utilização das áreas de solo mole. A escolha de uma delas dependerá de inúmeros fatores, como as condições do solo, o nível de recalque aceitável, o espaço disponível, além de custos e prazos de execução.

Uma das técnicas mais utilizadas para acelerar o processo de adensamento em solos moles é a aplicação de drenos verticais. A utilização de drenos verticais promove a aceleração dos recalques ao diminuir o caminho de drenagem dentro da massa de solo compressível para cerca da metade da distância horizontal entre drenos (ALMEIDA; MARQUES, 2010).

Neste trabalho será realizado o dimensionamento de drenos verticais de geotêxtil, a partir dos coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométrico e de piezocone realizados em três trechos de um depósito de argila mole em Suape/PE (BELLO, 2011). Para cada trecho, serão comparados o tempo de adensamento na situação com e sem o uso de geodrenos. Também serão comparados os valores de espaçamento obtidos com uso do geodrenos dimensionados, considerando a média dos coeficientes de adensamento obtidos no ensaio de piezocone e oedométrico.

1.2 Justificativa

A utilização de drenos verticais é uma técnica consagrada mundialmente para melhoramento de solos compressíveis, pois promove a aceleração dos recalques por meio da perda de água, reduzindo o volume de vazios, aumentando a resistência ao cisalhamento e melhorando sua capacidade de suporte.

Segundo Almeida e Marques (2010), os geodrenos consistem em um núcleo de plástico com ranhuras em forma de canaleta, envolto em um filtro de geossintético não tecido de baixa gramatura. Dentre as vantagens de sua utilização estão a facilidade de instalação, que é muito superior se comparado aos drenos verticais de areia, a alta capacidade drenante, uniformidade e qualidade da fabricação industrializada, enquanto que a qualidade de drenos de areia depende muito dos materiais e dos sistemas construtivos utilizados.

1.3 Motivação

Devido ao alto custo de tratamento da fundação em depósitos de solos moles, torna-se necessário conhecer o comportamento geotécnico do subsolo de forma mais precisa e buscar a otimização em soluções de engenharia.

Uma das soluções mais utilizadas na engenharia geotécnica, é o emprego de drenos verticais, que também pode ser utilizada em associação com outras técnicas de melhoramento de solo, visando a obtenção de resultados ainda mais satisfatórios. Visto a grande relevância desse tema, é de fundamental importância a compreensão do funcionamento e dimensionamento dos drenos, inclusive dos parâmetros geotécnicos associados ao mesmo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Dimensionar geodrenos para um aterro de solo mole em Suape/PE, a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios de laboratório (oedométricos) e de campo (piezocone).

1.4.2 Objetivos específicos

- Calcular a média dos coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométrico e de piezocone, para três trechos do depósito de argila mole estudado.
- Definir as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento).
- Determinar as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetro equivalente, diâmetro de influência, diâmetro da área amolgada).
- Estimar o espaçamento entre os geodrenos para que se atenda às necessidades do projeto.

- Comparar o tempo de adensamento na situação com uso de geodrenos e sem uso de geodrenos, para cada trecho.
- Comparar os valores de espaçamento entre os drenos obtidos no dimensionamento, considerando a média dos coeficientes de adensamento obtidos no ensaio de piezocone e oedométrico.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está subdividido em 5 capítulos, distribuídos da seguinte maneira:

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

O capítulo 1 apresenta a Introdução, na qual se tem uma visualização geral do trabalho desenvolvido, incluindo as considerações iniciais, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho.

CAPÍTULO II. REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o tema: adensamento de argilas saturadas, processo de adensamento, teoria de adensamento unidimensional de Terzaghi, coeficiente de adensamento obtidos em ensaios de piezocone e de adensamento oedométrico, uso de drenos verticais, geodrenos, adensamento com drenagem puramente radial e com drenagem combinada radial e vertical.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa, descrevendo a caracterização da área de estudo, determinação das variáveis utilizadas, procedimento para o levantamento dos dados e procedimentos para dimensionamento dos geodrenos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados do coeficiente de adensamento médio, grandezas relacionadas ao geodreno, diâmetro de influência e espaçamento entre os drenos considerando resultados obtidos em ensaio oedométrico e piezocone, e comparação desses, além da comparação do tempo de adensamento com e sem uso de geodrenos.

CAPÍTULO V. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

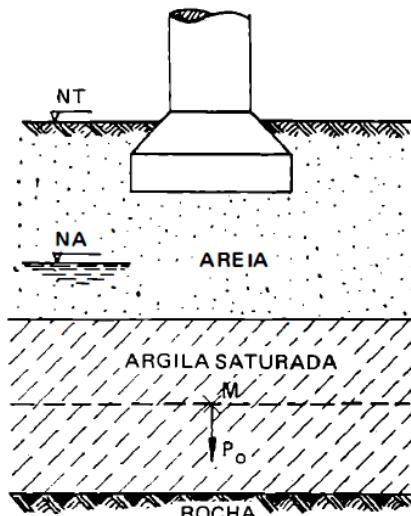
Nesse capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre temas de relevância para o presente estudo.

2.1 O Adensamento de Argilas Saturadas

A determinação das deformações devido à carregamentos verticais na superfície do terreno é um dos aspectos de maior interesse para a Engenharia Geotécnica. As deformações podem ocorrer rapidamente após a construção ou se desenvolver lentamente após a aplicação das cargas. Em solos arenosos ou argilosos não saturados são observadas deformações rápidas, enquanto que nos solos argilosos saturados os recalques podem ser muito lentos, pois é necessária a expulsão da água dos vazios presentes no solo. O processo de saída da água do interior dos vazios dos solos é chamado adensamento (SOUZA PINTO, 2006).

Caputo (1988) explica o processo de adensamento apresentando o caso mostrado na Figura 1, que mostra uma fundação que distribui sua carga a uma camada de argila saturada, limitada por areia e por um leito rochoso, impermeável.

Figura 1 – Perfil do solo sob a sapata



Fonte: Caputo, (1988)

Em um ponto M qualquer da camada compressível de argila saturada, admite-se que a pressão transmitida pela fundação seja p_0 . Parte dessa pressão, u , será transmitida à água e a outra parte, p , às suas partículas sólidas, obtendo:

$$p_0 = p + u \quad (1)$$

A pressão p é denominada pressão efetiva ou pressão grão a grão, e ao acréscimo de pressão neutra, u , chama-se sobrepressão hidrostática.

A água que está presa nos vazios do solo, sujeita a esta sobrepressão, escoa em direção vertical, no sentido da camada drenante de areia; no caso da argila, devido a sua baixa permeabilidade, o escoamento acontece de forma muito lenta.

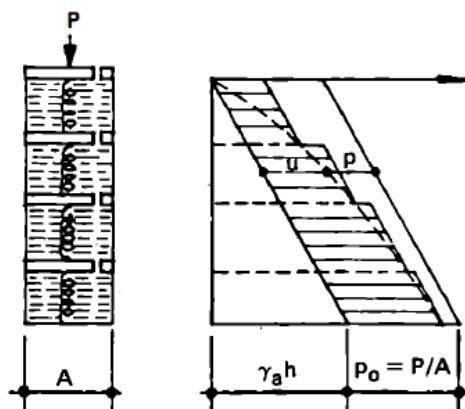
Dessa forma, a pressão u vai diminuindo até anular-se, e p vai aumentando, uma vez que p_0 é constante. Assim, no momento de aplicação da carga: $u = p_0$ e $p = 0$ e, no final, quando se encerra a transferência de pressões de u para p , praticamente $u = 0$ e $p = p_0$. Para uma fase intermediária qualquer, tem-se:

$$p_0 = p(t) + u(t) \quad (2)$$

2.2 Analogia Mecânica de Terzaghi

No mecanismo proposto por Terzaghi as molas representam a estrutura sólida do solo e os furos capilares nos êmbolos, seus vazios (Figura 2). A pressão nas molas (ou seja, na estrutura do solo) aumenta conforme a água escapa dos furos (ou então através dos poros do material). Para uma camada de solo confinada lateralmente, a expulsão da água intersticial reduzirá o volume de vazios, e consequentemente seu volume total. Essa redução do volume se dará por diminuição de altura, a qual se denomina recalque por adensamento.

Figura 2 – Analogia mecânica para o processo de adensamento



Fonte: Caputo, (1988)

2.3 Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi

Os procedimentos para analisar o comportamento de uma camada de solo compressível, para as condições de fluxo vertical e deformação unidimensional foram inicialmente apresentados por Terzaghi (1925) e Terzaghi e Frolich (1936), tornando-se uma das teorias mais utilizadas na engenharia geotécnica.

2.3.1 Hipóteses Simplificadoras

Apesar das hipóteses simplificadoras feitas, a teoria do adensamento permite avaliar de forma aproximada a velocidade dos recalques devido ao adensamento, com base nos resultados obtidos através de ensaios de laboratórios. A teoria de adensamento se baseia nas seguintes hipóteses simplificadoras:

- a) Solo homogêneo;
- b) Solo saturado;
- c) Compressibilidade dos grãos sólidos e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do solo;
- d) Não há diferença de comportamento entre massas de solo de pequenas e grandes espessuras;
- e) A compressão é unidimensional;
- f) O fluxo de água é unidirecional;
- g) É válida a lei de Darcy;
- h) Alguns parâmetros físicos que na realidade variam durante o processo são admitidos constantes;
- i) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento;
- j) Domínio dos pequenos deslocamentos e pequenas deformações.

2.3.2 Equação do Adensamento

Baseado nas hipóteses descritas acima a equação fundamental do adensamento desenvolvida por Terzaghi e Frolich (1936) é apresentada como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{Kv.(1+e)}{a_v + \gamma_w} \times \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

O segundo membro da equação reflete as características do solo e é denominado coeficiente de adensamento vertical (c_v), dado por:

$$c_v = \frac{K_v \cdot (1+e)}{a_v \cdot \gamma_w} = \frac{k_v}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (4)$$

onde:

K_v – coeficiente de permeabilidade vertical;

e – índice de vazios;

a_v – coeficiente de compressibilidade;

γ_v – peso específico da água;

m_v – coeficiente de deformação volumétrica;

c_v – coeficiente de adensamento vertical.

O coeficiente de compressibilidade (a_v) e o coeficiente de variação volumétrica (m_v) são definidos como:

$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v} \quad (5)$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} \quad (6)$$

onde:

Δe – variação do índice de vazios;

$\Delta \sigma_v$ – variação da tensão vertical efetiva.

Então, a equação básica de teoria do adensamento de Terzaghi é dada pela Equação 7.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (7)$$

A integração dessa equação apresenta a variável tempo vinculada ao coeficiente de adensamento e à maior distância de percolação da seguinte forma:

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad (8)$$

onde:

T – Fator tempo;

H_d – distância de drenagem;

t – Tempo.

A situação tridimensional o qual descreve o adensamento vertical e radial devido ao fluxo combinado vertical e radial é representado por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (9)$$

O coeficiente de adensamento horizontal (c_h) é dado pela expressão:

$$c_h = \frac{kh \cdot (1+e)}{a_v \cdot \gamma_w} \quad (10)$$

onde:

x, y, z – Coordenadas retangulares do ponto;

c_h – Coeficiente de adensamento horizontal;

Kh – Coeficiente de permeabilidade horizontal.

2.3.3 Grau de Adensamento

O progresso do processo de adensamento em um ponto pode ser expresso pelo grau de adensamento (U_z). Definido como a relação entre a deformação (ε) ocorrida em um elemento em uma certa profundidade z , em um determinado tempo t , e a deformação desse elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (ε_f):

$$U_z = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (11)$$

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

$$\varepsilon_f = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \quad (12)$$

Num instante t qualquer, o índice de vazios será e , e a deformação ocorrida até esse instante será:

$$\varepsilon = \frac{e_1 - e}{1 + e_1} \quad (13)$$

Logo, das relações apresentadas, tem-se:

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} \quad (14)$$

O grau de adensamento médio na teoria de Terzaghi e Frolich (1936) pode ser obtida pela expressão:

$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \times e^{-M^2 T_v} \quad (15)$$

onde:

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot (2m + 1), \text{ com } M > 0;$$

t – Tempo.

Segundo Taylor (1948), a expressão acima pode ter sua representação descrita pelas seguintes expressões empíricas:

$$T_v = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot U_v^2 \quad \text{para } U_v \leq 60\% \quad (16)$$

$$T_v = -0,9332 \cdot \log(1 - U) - 0,0851 \quad \text{para } U > 60\% \quad (17)$$

2.4 Ensaio de Piezocone

O ensaio de piezocone tem sido amplamente utilizado para determinação de parâmetros geotécnicos de argilas moles. O ensaio consiste na cravação contínua de um elemento cilíndrico com ponta cônica e na medida contínua da resistência de ponta (qc), da resistência por atrito lateral (fs) e da poropressão (u), sendo especificado conforme o MB 3406 (ABNT, 1991a).

O monitoramento da poropressão pode ser realizado utilizando um elemento poroso em uma das 3 posições do cone, na face (u_1), na base (u_2) e no fuste do cone (u_3).

Segundo Almeida e Marques (2010), os ensaios de dissipação do excesso de poropressões geradas durante a cravação do piezocone no solo podem ser interpretados para a obtenção do coeficiente de adensamento horizontal c_h e através deste determinar o coeficiente de adensamento vertical. O ensaio consiste na interrupção da cravação do piezocone em profundidades estabelecidas até ser atingido, no mínimo, um percentual de dissipação do excesso de poropressões de 50%.

O método de estimativa de c_h de Housby e Teh (1988) é o mais utilizado atualmente e leva em conta o índice de rigidez do solo (I_R), com o fator tempo definido como:

$$T = \frac{c_h \cdot t}{R^2 \sqrt{I_R}} \quad (18)$$

Onde:

R – Raio do piezocone;

t – Tempo de dissipação;

I_R – Índice de rigidez (G/S_u);

G – Módulo de cisalhamento do solo (usa-se em geral $G = E_u / 3$, sendo E_u o módulo de Young não drenado obtido do ensaio CU, usualmente obtido para 50% da tensão de desvio máxima).

Na Tabela 1 são listados os valores do fator tempo T^* em função da porcentagem de dissipação da poropressão (U) para a proposição de Housby e Teh (1988), observando-se que a solução é função da posição do elemento poroso no cone.

Tabela 1 – Fator tempo T^* em função da porcentagem de dissipação da poropressão (U)

Fator tempo T^* em função da posição do transdutor de poropressão		
U (%)	Face do cone (u_1)	Base do cone (u_2)
20	0,014	0,038
30	0,032	0,078
40	0,063	0,142
50	0,118	0,245
60	0,226	0,439
70	0,463	0,804
80	1,040	1,6

Fonte: Almeida e Marques, (2010)

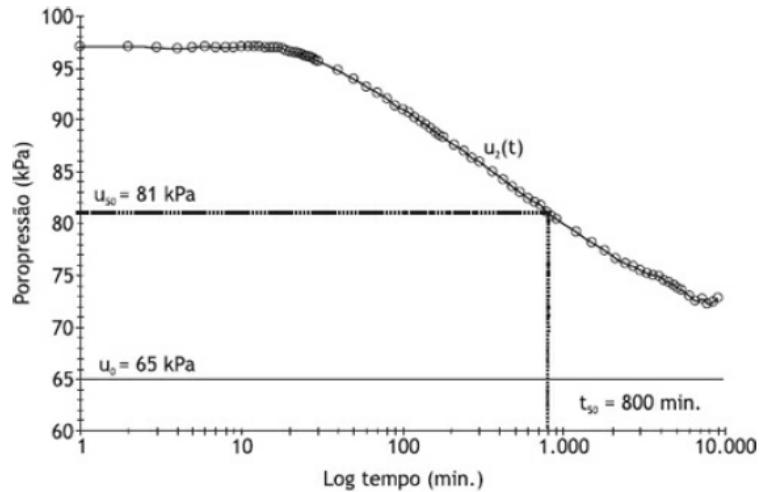
A medida de u_2 na base do cone é a padronizada e a mais utilizada para a interpretação dos resultados de dissipação. Qualquer procedimento para obtenção do c_h requer uma estimativa acurada do valor da poropressão no início da dissipação (u_1) e do valor da poropressão hidrostática (u_0). O mais comum, segundo Robertson *et al.* (1992), é a determinação do valor da poropressão $u_{50\%} = (u_i - u_0) / 2$, correspondente a 50% de dissipação, obtendo-se então o tempo t_{50} , conforme ilustrado na Figura 3.

Robertson *et al.* (1992) ainda propõem a estimativa direta do c_h a partir do valor de t_{50} utilizando- se o ábaco da Figura 4.

No entanto, o procedimento mais acurado é a obtenção de T^* e, então, de c_h por meio da superposição das curvas experimental e teórica, conforme proposto por Danziger *et.al.* (1996).

Para efeito de cálculo de velocidade de adensamento e comparação com valores de c_v medidos em ensaio de adensamento oedométrico na condição normalmente adensada $c_v(na)$, deve-se converter o valor de c_v medido no ensaio de piezocone no valor correspondente.

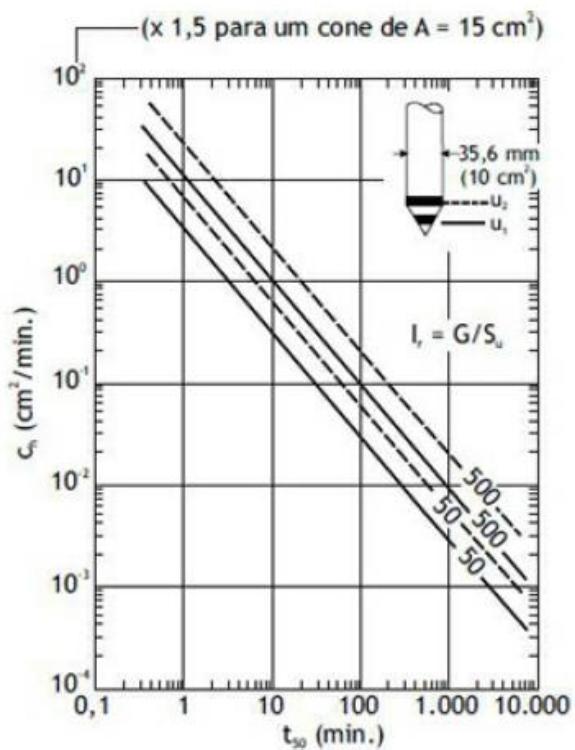
Figura 3 – Exemplo de cálculo de c_h - ensaio de dissipação na Barra da Tijuca (RJ)



$u_i = 97 \text{ kPa}$ – poropressão no início do ensaio de dissipação
 $u_0 = 65 \text{ kPa}$ – poropressão hidrostática na profundidade do ensaio de dissipação
 $\Delta u = 32 \text{ kPa}$;
 $\Delta u_{50} = 16 \text{ kPa}$
 $u_{50} = (97 - 16) \text{ kPa} = 81 \text{ kPa}$

Fonte: Almeida e Marques, (2010)

Figura 4 – Ábaco para obtenção de c_h por meio de t_{50}



Fonte: Almeida e Marques, (2010)

2.5 Ensaio de Adensamento Oedométrico

O valor do c_v pode ser determinado diretamente do ensaio de adensamento. O ensaio de adensamento convencional de carregamento incremental é o mais utilizado sendo descrito pela NBR 12007 – ABNT (1990). Cada incremento de carga é aplicado durante 24 horas, porém podem ser realizados estágios intermediários de carga para que a tensão de sobreadensamento seja melhor determinada.

Segundo Pinto (2006), em cada estágio de carregamento do ensaio, obtém-se a evolução dos recalques em função do tempo. O ajuste da curva obtida no ensaio com a curva teórica permite determinar o coeficiente de adensamento, aplicando-se o tempo real em que ocorreu um certo recalque e o fator tempo correspondente à porcentagem de recalque, na Equação 8 reformulada:

$$c_v = \frac{T \cdot H_d^2}{t} \quad (19)$$

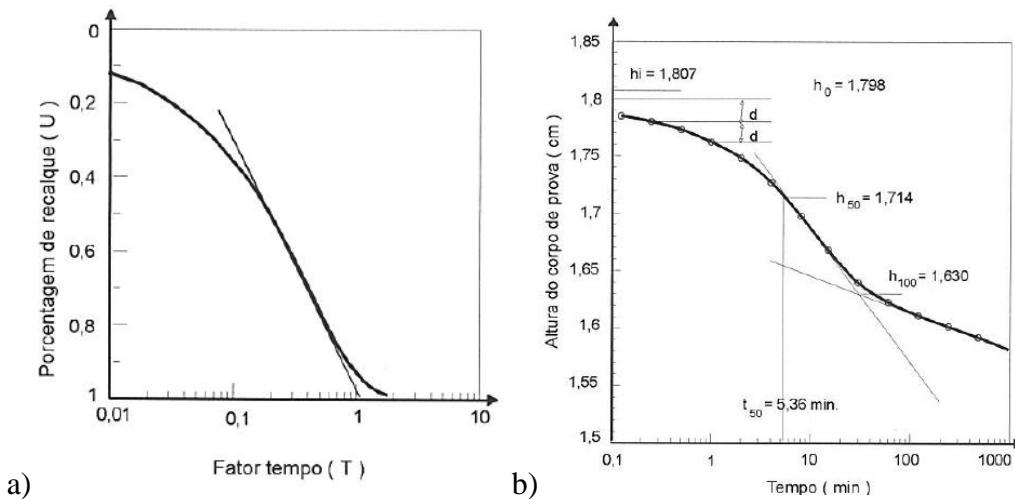
Ainda segundo Pinto (2006), o ajuste dos dados experimentais não é tão simples pois na prática não ocorre apenas o adensamento previsto pela teoria. Quando um corpo de prova é submetido a um carregamento, existe uma compressão inicial, resultante da possível compressão de bolhas de ar que a amostra possa ter e a ajustes nas interfaces do corpo de prova. Inicia-se a expulsão de água, tratada pela teoria de adensamento, e que recebe o nome de adensamento primário. Antes que o adensamento primário termine, inicia-se uma deformação lenta residual que ocorre sem a expulsão de água dos vazios, que recebe o nome de adensamento secundário.

O fato do adensamento secundário iniciar-se antes do término do adensamento primário, impede a determinação simples do seu final. Por isso recorre-se à métodos mais elaborados que permitam estimar os índices de vazios correspondentes ao início e ao fim do adensamento primário, possibilitando assim, a determinação do coeficiente.

2.5.1 Método de Casagrande

Este método, descrito em Pinto (2006), baseia-se no formato da curva de porcentagem de recalque, U , em função do fator tempo, T , lançada em escala semilogarítmica, como mostrado na Figura 5a. Os dados do ensaio foram colocados em função do logaritmo do tempo como mostra a Figura 5b, destacando assim o trecho de adensamento primário.

Figura 5 – Determinação de c_v pelo método de Casagrande: (a) curva de porcentagem de recalque, U , em função do fator tempo, T ; (b) função do logaritmo do tempo.



Fonte: Pinto, (2006)

As operações são as seguintes (Pinto, 2006):

- 1) Determina-se a altura do corpo de prova correspondente ao início do adensamento primário, que não é necessariamente a altura antes da aplicação da carga, em virtude da compressão inicial. Como a parte inicial da curva é parabólica, conforme visto acima, toma-se a ordenada para um tempo qualquer no trecho inicial, t , verifica-se sua diferença com a ordenada para um tempo $4t$ e soma-se esta diferença com a ordenada para um tempo t , obtendo-se assim a ordenada correspondente ao início do adensamento primário. O procedimento pode ser verificado repetindo-se para dois ou mais tempos t na parte inicial da curva e comparando-se os resultados.
- 2) Estima-se a altura do corpo de prova correspondente ao final do adensamento primário pela ordenada da interseção da tangente ao ponto de inflexão da curva com a assíntota ao trecho final da curva, que na escala logarítmica é linear e que corresponde ao adensamento secundário.
- 3) Determina-se a altura do corpo de prova quando 50% do adensamento tiver ocorrido, que é a média dos dois valores obtidos anteriormente.
- 4) Verifica-se, pela curva, o tempo em que teriam ocorrido 50% dos recalques por adensamento primário.
- 5) Calcula-se o coeficiente de adensamento pela equação:

$$c_v = \frac{0,197 \cdot H_d^2}{t_{50}} \quad (20)$$

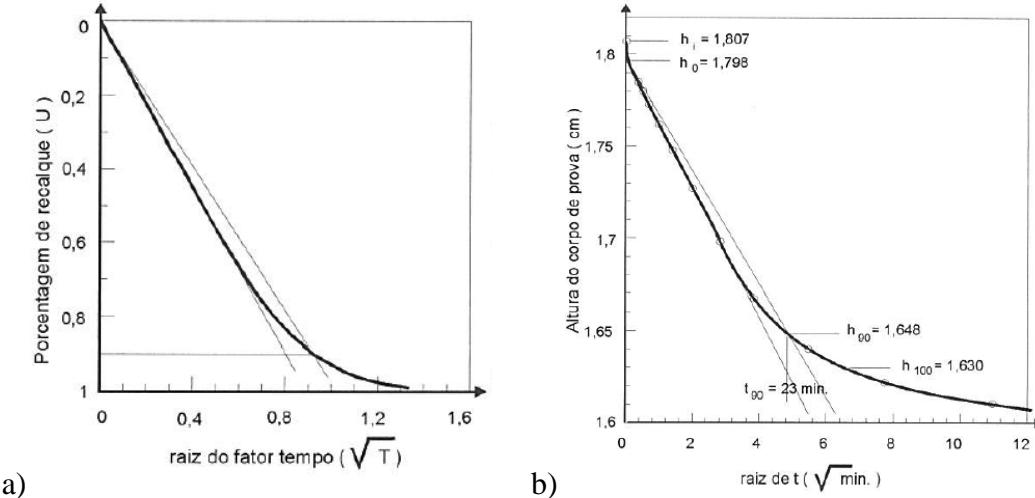
Onde 0,197 é o fator tempo correspondente a 50% do adensamento; t_{50} é o tempo em que ocorreram 50% de recalque; e H_d é a metade da altura média do corpo de prova.

2.5.2 Método de Taylor

Segundo Pinto (2006), este método baseia-se no formato da curva U em função de T, quando a raiz quadrada do fator tempo é colocada em abscissas, como mostrado na Figura 6a. Nesta representação o trecho inicial da curva é realçado que, por ser parabólico, apresenta-se como uma reta.

Ainda de acordo com Pinto (2006), os dados do ensaio são colocados em função da raiz quadrada do tempo, como apresentado na Figura 6b. O trecho inicial é aproximadamente uma reta, sua interseção com o eixo das ordenadas indica a altura do corpo de prova antes do adensamento. A compressão inicial é indicada pela diferença entre este ponto e a altura do corpo de prova antes do carregamento.

Figura 6 – Determinação de c_v pelo método de Taylor: (a) curva U em função de T, quando a raiz quadrada do fator tempo nas abscissas; (b) função da raiz quadrada do tempo



Fonte: Pinto, (2006)

Do início do adensamento primário, traça-se uma reta com abscissas iguais a 1,15 vezes as abscissas correspondentes da reta inicial. A interseção desta reta com a curva do ensaio aponta o ponto em que 90% dos recalques teriam ocorridos. Tal afirmativa é decorrente da equação parabólica da parte inicial da curva de adensamento para $U = 0,9$, $T = 0,64$, cuja raiz

quadrada é 0,80. Pela solução da teoria do adensamento, para $U = 0,9$, $T = 0,848$, cuja raiz quadrada é 0,92, ou seja, 15% maior do que 0,80.

Definido o ponto correspondente a 90% de recalque, em que isto ocorreu, o tempo, t_{90} , é determinado, e o coeficiente de adensamento pode, então, ser calculado pela Equação 21:

$$c_v = \frac{0,848 \cdot H_d^2}{t_{90}} \quad (21)$$

2.6 Drenos Verticais

Uma das alternativas construtivas para aceleração dos recalques, e consequentemente do ganho de resistência do solo compressível é a utilização de drenos verticais. Deve se ressaltar que a utilização de drenos verticais não interfere na magnitude dos recalques, porém pode promover a redução dos recalques primários e secundários pós-construtivos quando associada à sobrecarga (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES,2010).

Com a utilização de drenos verticais, o caminho que a água tem que percorrer dentro dos vazios do solo diminui, isso porque a direção do fluxo de água na massa do solo passa a ser predominantemente horizontal, promovendo a redução do tempo necessário para que o processo de adensamento ocorra.

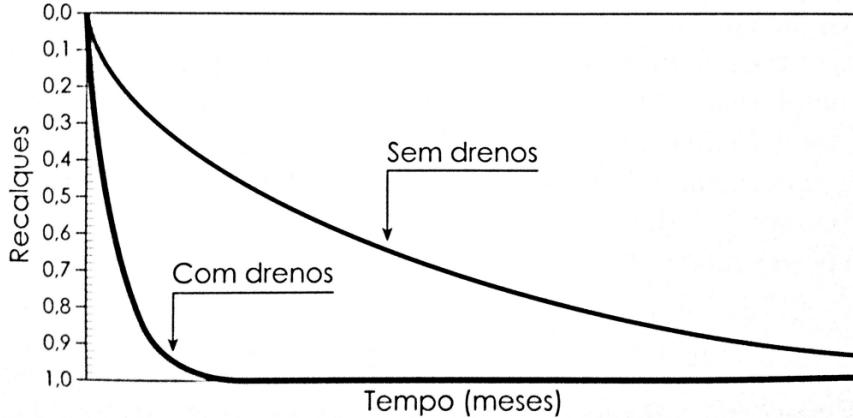
2.6.1 Geodrenos

Os drenos verticais foram pioneiramente utilizados ao final da década de 20, na Califórnia, nos Estados Unidos, porém em forma de dreno vertical de areia. Cerca de dez anos depois, Kjellman desenvolveu na Suécia o primeiro protótipo de dreno pré-fabricado, feito com papelão, que foram utilizados até o início dos anos 1970. O núcleo de papelão foi posteriormente substituído por material sintético com filtro de papel. Filtros geotêxtil foram incorporados em modelos posteriores do dreno, que constituem os atuais drenos verticais pré-fabricados.

Os geodrenos são geocompostos drenantes específicos, apresentados em tiras, com cerca de 10cm de largura e dezenas de metros de comprimento. Atualmente são utilizados em todo o mundo, principalmente no Sudeste Asiático, na Europa e na América (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES,2010).

A Figura 7 mostra a vantagem na utilização e geodrenos para aceleração dos recalques. Os resultados de monitoramento comprovam a aceleração quando se compara aterros construídos sobre drenos e os aterros convencionais.

Figura 7 – Comparação de recalque com e sem utilização de drenos



Fonte: Oliveira, Almeida e Marques (2010)

2.6.2 Adensamento com Drenagem Puramente Radial

Para drenos verticais, caso a drenagem vertical na massa de solo não seja considerada, tem-se a drenagem radial pura, dada pela equação:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] \quad (22)$$

Barron (1948) resolveu a equação acima para um cilindro de solo com um dreno vertical em forma de cilindro para a condição de deformações verticais iguais, obtendo o grau de adensamento médio da camada, \bar{U}_h .

$$\bar{U}_h = 1 - e^{-[8T_h/F(n)]} \quad (23)$$

Onde:

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} \quad (24)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \cong \ln(n) - 0,75 \quad (25)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (26)$$

Sendo:

d_e o diâmetro de influência de um dreno;

d_w o diâmetro do dreno ou diâmetro equivalente de um geodreno com seção retangular;

T_h o fator tempo para drenagem horizontal; e

$F(n)$ uma função da densidade de drenos.

2.6.3 Adensamento com Drenagem Combinada Radial e Vertical

Na prática, no caso de utilização de dreno vertical em camadas de solo compressível com espessuras inferiores a 10m, deve-se considerar, além da drenagem radial, a contribuição da drenagem vertical. A ocorrência simultânea das duas é denominada drenagem combinada. Esta foi tratada teoricamente por Carrillo (1942) que obteve a Equação 27 para o grau de adensamento médio global ou combinado \bar{U} .

$$(1 - \bar{U}) = (1 - \bar{U}_v) \cdot (1 - \bar{U}_h) \quad (27)$$

2.6.4 Parâmetros necessários ao dimensionamento de geodrenos

Segundo Holtz et al. (2001), para melhorar a confiabilidade na determinação dos parâmetros geotécnicos necessários ao dimensionamento de geodrenos são recomendados ensaios de laboratório e de campo. Os ensaios de dissipação de piezocone (campo) e ensaios oedométricos (laboratório) são recomendados para obras de pequeno porte. Para grandes obras, além dos ensaios citados é recomendado também a execução de aterros experimentais.

O valor de c_h a adotar, pode ser definido tanto a partir do ensaio de dissipação de piezocone, como também dos ensaios de adensamento oedométricos. Na ausência de ensaios de campo podem-se, em análises preliminares, realizar ensaios de adensamento oedométrico convencional, estimando-se c_h através do c_v determinado nesses ensaios, fazendo uso da Equação 28.

$$c_h = \frac{k_h}{k_v} \cdot c_v \quad (28)$$

A relação entre k_h e k_v é chamada de razão de permeabilidade em argilas, e dependerá da natureza da mesma. Almeida e Marques (2010) recomendam que para argilas brasileiras seja considerada uma razão de permeabilidade entre 1,5 e 2.

2.6.5 Especificação dos Geodrenos

Um geodreno deve possuir a principal característica de ser mais permeável que o solo sem alteração dessa propriedade durante sua vida útil. Portanto, o dreno é especificado basicamente por sua capacidade de vazão e permeabilidade do filtro. Outras características importantes são a resistência mecânica e flexibilidade, pois o dreno deve apresentar resistência às operações de cravação e às deformações impostas pelo solo durante o processo de adensamento (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES, 2010).

Bergado et al. (1994) e Holtz et al. (2001) propõem que a capacidade de vazão ou descarga do geodreno q_w , não seja inferior a um valor entre 9 e $13,5 \times 10^{-6}$ L/s ($100\sim150$ m 3 /ano), quando medido sob um gradiente hidráulico unitário e sob a pressão lateral máxima efetiva confinante. Para condições críticas a permeabilidade do filtro deve ser maior que dez vezes a do solo, e iguais à do solo para aplicações menos críticas, devendo ser adotada a maior abertura de filtração do geotêxtil possível.

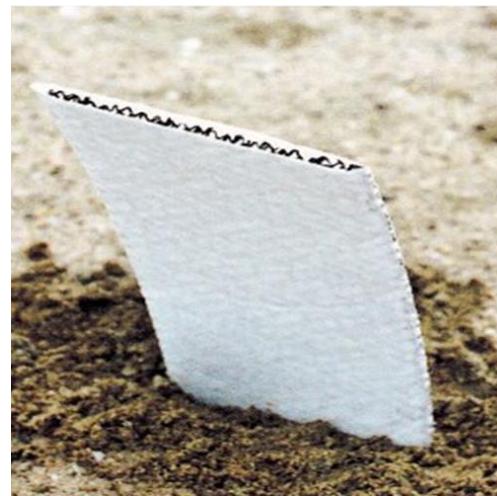
2.6.6 Principais Utilizações dos Geodrenos

A técnica de melhoramento do solo de fundação utilizando geodrenos é bastante útil para a construção de aterros sobre solos moles em etapas, devido à grande redução do tempo de cada etapa, viabilizando economicamente sua adoção. Possui grande aplicação na construção de aterros rodoviários, aeroportuários, portuários, áreas de estocagem em geral e fundações de estruturas submetidas a baixas tensões, quando assentadas sobre solos compressíveis.

Os geodrenos são tanto mais eficazes quanto maior a permeabilidade horizontal, a estratificação ou a macrotextura do solo, pois promove a redução da distância de drenagem, otimizando o adensamento.

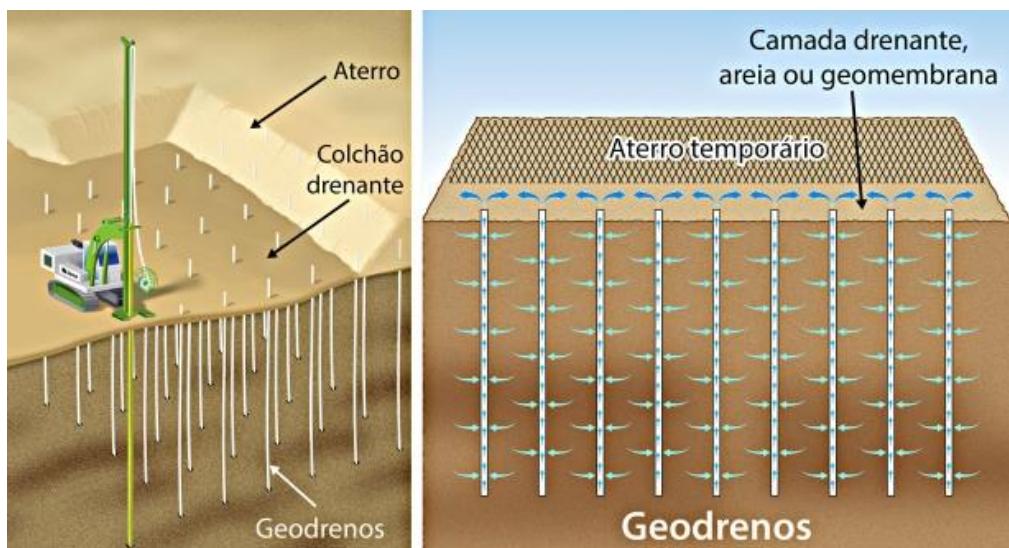
A vantagem em termos de tempo para a obtenção de um determinado grau de adensamento, se comparado à situação sem o uso de drenos, depende da espessura da camada compressível e do coeficiente de adensamento. Para camadas de pequena espessura ou com elevado coeficiente de adensamento, o dimensionamento pode indicar um pequeno aumento no desempenho, em termos de economia de tempo e adensamento (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES, 2010). Uma ilustração de um geodreno e sua instalação são apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 – Geodreno



Fonte: Motriz, (2017)

Figura 9 – Instalação dos geodrenos



Fonte: Solotrat, (2018)

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações Iniciais

O presente trabalho consiste no dimensionamento de geodrenos utilizando dados obtidos de ensaios de laboratório e campo de um depósito de argila mole, localizado no Complexo Industrial Portuário de Suape, estudado por Bello (2011).

Foram utilizados os dados da área de estudo AE-1, três trechos localizados entre as estacas E98, E102, E112 e E120. Foram retiradas amostras indeformadas nesses pontos, e realizados ensaios de laboratório (caracterização, compressibilidade e resistência) e de campo (palheta e piezocone sísmico).

A partir dos ensaios de piezocone e oedométrico foram encontrados os valores dos coeficientes de adensamento, necessários ao dimensionamento dos geodrenos.

Foram definidas as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento) e determinada as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetro equivalente, diâmetro de influência, diâmetro da área amolgada).

A Tabela 2 apresenta o roteiro para o dimensionamento dos geodrenos realizados na pesquisa. A média dos coeficientes de adensamento foi calculada para cada um dos três trechos, considerando os dados dos ensaios oedométricos e de piezocone. Foi realizada a comparação dos resultados de espaçamento entre os drenos, dimensionados a partir de coeficientes de adensamento dos dois ensaios. E finalmente, comparou-se o tempo de adensamento com o uso e sem uso de geodrenos para os três trechos.

Tabela 2 - Roteiro para o dimensionamento dos geodrenos

PROCEDIMENTO	
Passo 1	Calcular a média dos coeficientes de adensamento para o ensaio de piezocone e oedométrico
Passo 2	Definir as necessidades do projeto (profundidade dos geodrenos, tempo e grau de adensamento)
Passo 3	Determinar as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetros equivalente, de influência, da área amolgada).
Passo 4	Estimar o espaçamento entre os geodrenos e comparar os resultados para os dois ensaios
Passo 5	Comparar o tempo de adensamento na situação com uso e sem o uso de geodrenos

3.2 Área de Estudo

O complexo Industrial e Portuário de Suape é o mais completo polo para a localização de negócios industriais e portuários da Região Nordeste. Está localizado no município de Ipojuca, ao sul da cidade do Recife, à 52km da capital. Este município é limitado ao norte pelo município de Cabo de Santo Agostinho, ao sul com o município de Sirinhaém, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o município de Escada.

Segundo Bello (2011), a área de estudo AE-1 está localizada no Complexo Industrial e Portuário de Suape, em uma área de mangue virgem, caracterizada pela presença de solos moles/ orgânicos, com restos de plantas e raízes, tratando-se de uma via de acesso no sentido continente – mar. A Figura 10 mostra a vista geral da área estudada.

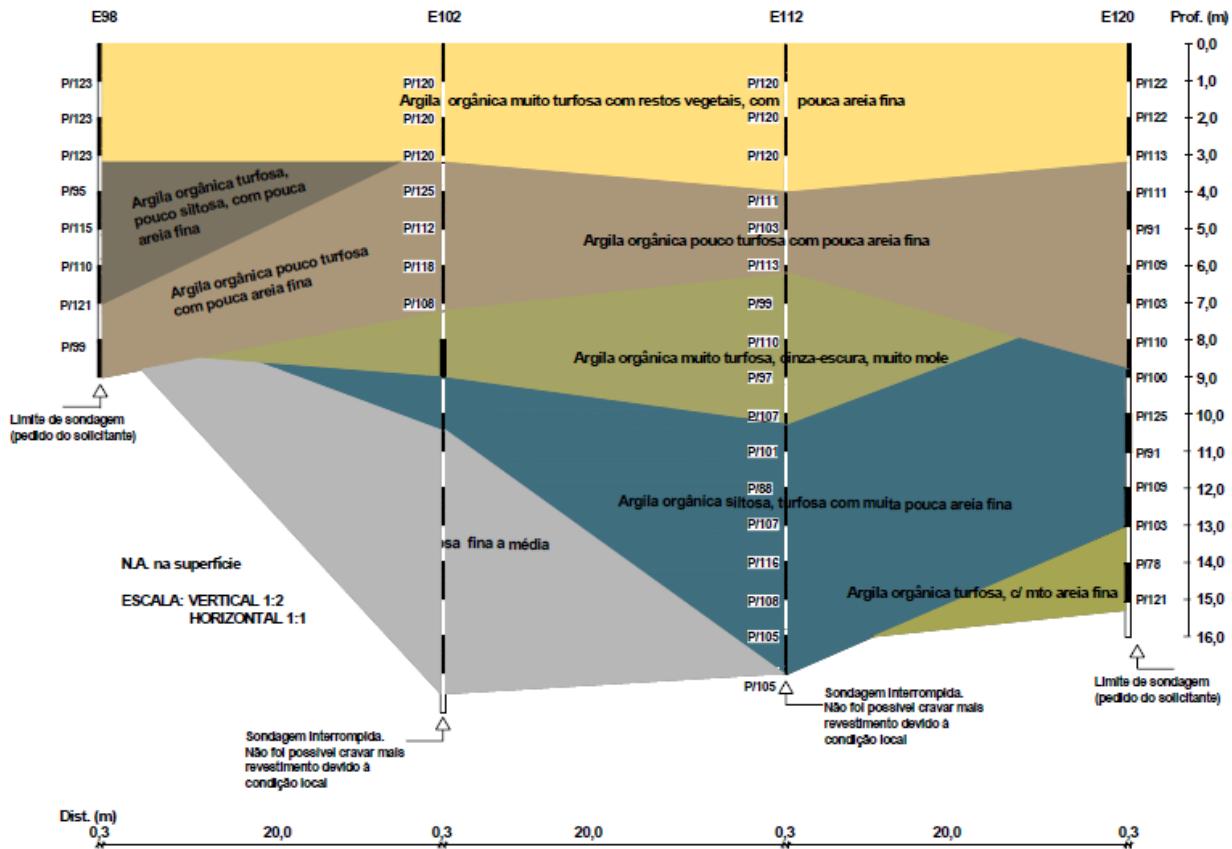
O aterro da área AE-1 foi dividido em dois trechos longitudinais. O trecho 1 foi escolhido para estudo deste trabalho. Nesse trecho foram retiradas amostras e realizados ensaios nas estacas (E98, E102, E112 e E120). Foram coletadas 19 amostras indeformadas tipo pistão estacionário de paredes finas, com tubo aço-inox com diâmetro 4'' e 4,5'' (100 e 110mm) e comprimento 1000mm. O perfil geotécnico do trecho é mostrado na Figura 11.

Figura 10 – Vista Geral Acesso à área de estudo AE-1 - Investigação Geotécnica



Fonte: Bello, (2010)

Figura 11 – Perfil Geotécnico da área de estudo AE-1



Fonte: Bello, (2010)

Na Tabela 3 são mostrados os valores dos coeficientes de adensamento horizontal e vertical, obtidos do ensaio oedométrico. Por meio do ensaio de piezocone pode-se obter os valores do coeficiente de adensamento horizontal, no entanto, o coeficiente de adensamento vertical não é obtido diretamente, para isso foi utilizada a Equação 28.

Foi utilizado o valor de 1,5 para a relação entre k_h e k_v , que está no intervalo recomendado por Almeida e Marques (2010) para argilas brasileiras.

A Tabela 4 mostra os valores dos coeficientes de adensamento obtidos do ensaio de piezocone. Esses valores de c_h correspondem a propriedades de solo na faixa pré-adensada. Segundo Baligh e Levadoux (1986), durante a penetração, o material ao redor do cone é submetido à elevados níveis de deformações e a partir desse estado comporta-se como um solo em recompressão. O c_h na faixa normalmente adensada foi estimado utilizando a seguinte relação proposta por Jamiolkowski et al. (1985):

$$c_h(N.A) = \frac{c_c}{c_s} \cdot c_{h \text{ piezocone}} \quad (29)$$

Onde :

c_c é o índice de compressão

c_s é o índice de recompressão

Lacerda e Almeida (1995) apresentam o valor de 0,10 para a relação C_c / C_s em ensaios realizados na Barra da Tijuca, sendo este adotado no trabalho.

O dimensionamento dos drenos foi feito para os trechos entre as estacas E98 e E102 (trecho 1), E102 e E112 (trecho 2) e E112 e E120 (trecho 3), conforme apresentados na Figura 11. Cada trecho tem 20m de extensão, sendo considerada uma profundidade de 10m, 12 m e 18m respectivamente para cada trecho entre as estacas.

Tabela 3 – Resultados de c_v e c_h obtidos do ensaio de adensamento oedométrico

Estacas	Profundidade (m)	c_v (m²/s)	c_h (m²/s)
E98	2 a 3	0,0146x10 ⁻⁶	0,0126x10 ⁻⁶
	4 a 4,74	0,0142x10 ⁻⁶	0,0134x10 ⁻⁶
	6 a 7	0,0068x10 ⁻⁶	-
	8 a 9	0,0183x10 ⁻⁶	-
E102	2 a 3	0,0215x10 ⁻⁶	0,3022x10 ⁻⁶
	4,65 a 5,65	0,0151x10 ⁻⁶	0,1036x10 ⁻⁶
	6,5 a 7,5	0,0494x10 ⁻⁶	-
	8,5 a 9,5	0,0389x10 ⁻⁶	-
E112	2 a 3	0,0336x10 ⁻⁶	-
	4 a 5	0,0117x10 ⁻⁶	-
	6 a 7	0,0275x10 ⁻⁶	0,3202x10 ⁻⁶
	8 a 9	0,0171x10 ⁻⁶	-
	10 a 11	0,0499x10 ⁻⁶	0,2919x10 ⁻⁶
	14 a 15	0,0317x10 ⁻⁶	-
	17,5 a 18,5	0,0254x10 ⁻⁶	0,3306x10 ⁻⁶
E120	2 a 3	0,0374x10 ⁻⁶	-
	4 a 5	0,0141x10 ⁻⁶	0,1258x10 ⁻⁶
	6 a 7	0,0853x10 ⁻⁶	0,1361x10 ⁻⁶
	9 a 10	0,1229x10 ⁻⁶	-

Fonte: Bello, (2010)

Tabela 4 – Resultados de c_v e c_h obtidos do ensaio de piezocone

Estacas	Profundidade (m)	c_h (m²/s)	c_v (m²/s)
E98	4	$5,90 \times 10^{-7}$	$3,93 \times 10^{-7}$
	6	$1,10 \times 10^{-6}$	$7,33 \times 10^{-7}$
	8	$5,70 \times 10^{-7}$	$3,80 \times 10^{-7}$
	10	$4,00 \times 10^{-7}$	$2,67 \times 10^{-7}$
E102	4	$1,60 \times 10^{-7}$	$1,07 \times 10^{-7}$
	6	$9,30 \times 10^{-8}$	$6,20 \times 10^{-8}$
	8	$1,00 \times 10^{-8}$	$6,70 \times 10^{-9}$
	10	$1,20 \times 10^{-6}$	$8,00 \times 10^{-7}$
E112	4	$8,00 \times 10^{-9}$	$5,30 \times 10^{-9}$
	6	$5,70 \times 10^{-8}$	$3,80 \times 10^{-8}$
	10	$4,00 \times 10^{-8}$	$2,67 \times 10^{-8}$
	12	$9,10 \times 10^{-8}$	$6,07 \times 10^{-8}$
	16	$3,80 \times 10^{-9}$	$2,50 \times 10^{-9}$
E120	18	$1,50 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-7}$
	4	$9,10 \times 10^{-7}$	$6,07 \times 10^{-7}$
	8	$3,00 \times 10^{-7}$	$2,00 \times 10^{-7}$

Fonte: Bello, (2010)

3.3 Dimensionamento de Geodrenos

Para o dimensionamento dos geodrenos na área de estudo, foram considerados os cálculos e considerações geométricas do diâmetro de influência e espaçamento, diâmetro equivalente e a influência do amolgamento na instalação do dreno. A resistência hidráulica do dreno não foi considerada pois, segundo Hansbo (2004) a maioria dos geodrenos disponíveis no mercado tem capacidade de descarga suficiente, de forma a tornar essa questão desprezível em projeto.

3.3.1 Diâmetro de Influência e espaçamento

Os geodrenos foram dimensionados para instalação em malhas triangulares de lado igual a l . A escolha da malha triangular foi feita por esta ser mais eficiente do que a malha quadrada. A malha está representada na Figura 12.

O diâmetro de influência da malha triangular foi calculado igualando a área do hexágono com a do círculo equivalente:

$$d_e = 1,05 \cdot l \quad (30)$$

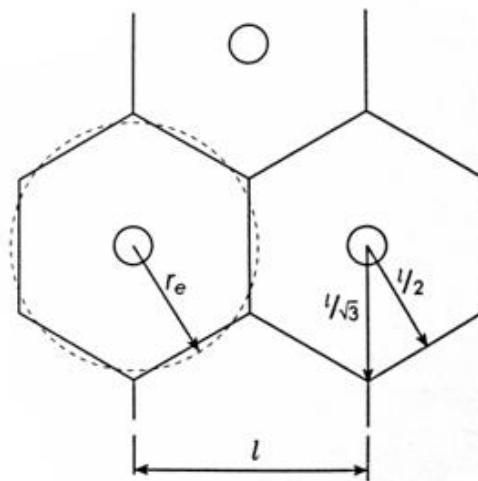
3.3.2 Diâmetro equivalente dos geodrenos

Os geodrenos possuem formato retangular e por isso suas dimensões devem ser representadas por um diâmetro equivalente (d_w) conforme apresentado na Figura 13.

Para a determinação do diâmetro equivalente do dreno foi utilizada a Equação 31, proposta por Rixner et al. (1986) e por Hansbo (1987):

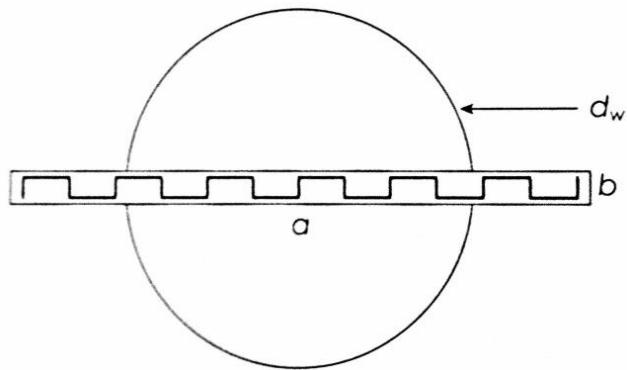
$$d_w = \frac{(a+b)}{2} \quad (31)$$

Figura 12 – Malha de drenos triangulares



Fonte: Oliveira, Almeida e Marques, (2010)

Figura 13 – Diâmetro equivalente do geodreno



Fonte: Oliveira, Almeida e Marques, (2010)

O geodreno utilizado no dimensionamento é o geocomposto drenante CX1000 da TDM Brasil. O CX1000 é um dreno vertical pré-fabricado, conformado por camada polimérica,

coberto em ambas as faces por um geotêxtil permeável não tecido. A fixação do conjunto se dá a partir de um envolvimento em membrana de látex. Suas dimensões são 10cm de largura e 0,4cm de espessura.

3.3.3 Influência do amolgamento na instalação do dreno

Nos cálculos levou-se em consideração o amolgamento do solo compressível ao redor e ao longo do dreno, devido a sua instalação. O amolgamento reduz a permeabilidade horizontal do solo, e em consequência, a velocidade do adensamento (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES, 2010).

Deve-se acrescentar ao valor de $F(n)$, no cálculo do adensamento com drenagem puramente radial, o valor de F_s (HANSBO, 1981):

$$F_s = \left[\left(\frac{k_h}{k'_h} \right) - 1 \right] \cdot \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \quad (32)$$

Onde:

d_s é o diâmetro da área afetada pelo amolgamento;

$d_s = 2d_m$; onde d_m é o diâmetro do mandril de cravação (HANSBO, 1987);

$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot w \cdot t}$; onde w e t são dimensões de mandril retangular (BERGADO, 1994);

k'_h é a permeabilidade horizontal da área afetada pelo amolgamento.

O valor de k'_h depende da realização de ensaios especiais, raramente realizados. Foi utilizado a relação proposta por Hansbo (1981) devido à falta de dados (Eq. 33).

$$\frac{k_h}{k'_h} = \frac{k_h}{k_v} \quad (33)$$

O mandril foi escolhido de modo a ter a menor área possível para que o amolgamento fosse minimizado. Almeida e Marques (2010) recomendam que para espessuras de solo muito mole de até 15 m aproximadamente, por questões estruturais do equipamento de cravação, a área externa do mandril seja da ordem de 70cm². Um mandril de 12 cm x 6 cm foi escolhido para os cálculos nos três segmentos estudados, como o terceiro segmento possui profundidade de 18m, talvez seja necessário reforçar o mandril para esse trecho, no entanto o amolgamento aumentará, sendo necessário recalcular o tempo em que ocorrerá o adensamento pretendido no projeto.

3.3.4 Roteiro de Dimensionamento

O dimensionamento de um sistema de drenos tem como objetivo determinar o espaçamento entre os drenos, a fim de se obter o grau de adensamento médio da camada desejada em um período de tempo considerado aceitável. O dimensionamento foi feito considerando as hipóteses simplificadoras de Terzaghi.

Com o auxílio do Microsoft Excel, foi desenvolvido um roteiro de cálculo, analisando cada um dos três trechos separadamente. Os cálculos foram feitos para os ensaios de piezocone e oedométrico.

Com os parâmetros geotécnicos c_h , c_v e k_h/k'_h definidos de cada trecho a ser analisado, foi definido o padrão de cravação da malha. A partir disso determinou-se as grandezas geométricas pertinentes ao dreno, d_w , d_s , d_m e h_{arg} .

Considerou-se no projeto, um grau de adensamento médio desejado para a camada de 90% e um tempo de projeto aceitável de 1 ano. O tipo de drenagem utilizada foi a radial devido à drenagem vertical ter mais influência para camadas de solo inferiores à 10m, e também por ser mais conservativa. Foi realizada uma estimativa inicial para o espaçamento l e calculado o valor de d_e .

Foi encontrado o efeito do amolgamento do solo devido à instalação do dreno, sendo este valor adicionado à função de densidade de drenos determinada anteriormente através da equação 25, na análise de adensamento com drenagem puramente radial. Neste tipo de drenagem $\overline{U_h} = \overline{U}$, logo pode- se isolar o fator tempo T_h na equação 23 (grau de adensamento médio $\overline{U_h}$ da camada), obtendo a seguinte equação:

$$T_h = \frac{-\ln(1-\overline{U_h}) \cdot F(n)}{8} \quad (34)$$

O tempo necessário para se obter o adensamento desejado é:

$$t_{calc} = \frac{T_h \cdot d_e^2}{c_h} \quad (35)$$

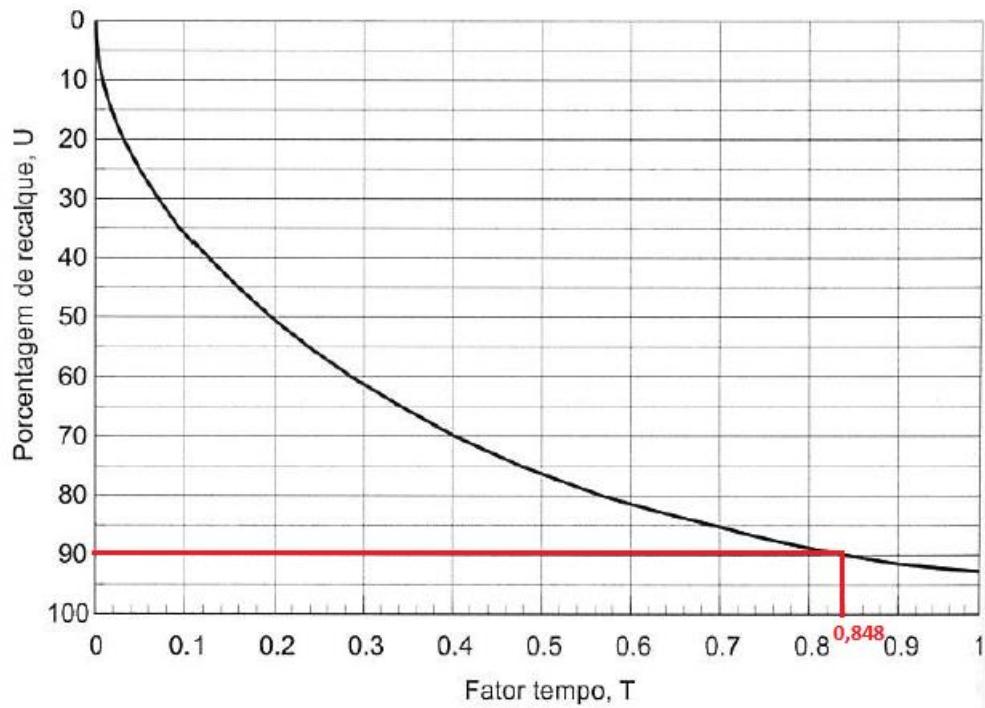
O valor de l foi reduzido tentativamente até que o tempo calculado fosse menor ou igual ao desejável para o projeto. Segundo Almeida e Marques (2010) as recomendações atuais no Brasil indicam um espaçamento mínimo entre os drenos de 1,5m.

Para fins de comparação, foi realizado o cálculo do tempo de adensamento para uma situação sem a utilização de drenos, utilizando a seguinte equação:

$$t = \frac{T \cdot H_d^2}{c_v} \quad (36)$$

Onde T é o fator tempo, que foi encontrado a partir do gráfico da Figura 14. Para um adensamento de 90%, H_d é a altura de drenagem do trecho, considerada metade da altura da camada de argila, e c_v é o coeficiente de adensamento vertical do trecho.

Figura 14 – Curva de adensamento (porcentagem de recalque em função do fator tempo)



Fonte: Pinto, (2006)

Figura 15 – Planilha de dimensionamento para o ensaio de piezocone

 <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO ACADÉMICO DO AGRESTE ENGENHARIA CIVIL MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOS</p>		<p>DEFINIÇÕES DE PROJETO</p> <table border="1"> <tr> <td>Tempo aceitável (anos)</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Padrão de cravação</td><td>triangular</td></tr> <tr> <td>dm (mm)</td><td>95,77</td></tr> <tr> <td>Tipo de drenagem</td><td>radial</td></tr> <tr> <td>kh/k'h</td><td>1,5</td></tr> </table>		Tempo aceitável (anos)	1	Padrão de cravação	triangular	dm (mm)	95,77	Tipo de drenagem	radial	kh/k'h	1,5	<p>PROPRIEDADES DO GEODRENO</p> <table border="1"> <tr> <td>dw (mm)</td><td>70</td></tr> <tr> <td>ds (mm)</td><td>191,54</td></tr> </table>		dw (mm)	70	ds (mm)	191,54																						
Tempo aceitável (anos)	1																																								
Padrão de cravação	triangular																																								
dm (mm)	95,77																																								
Tipo de drenagem	radial																																								
kh/k'h	1,5																																								
dw (mm)	70																																								
ds (mm)	191,54																																								
<p>TRECHO 1 (E98 - E102)</p>		<p>TRECHO 2 (E102 - E112)</p>		<p>TRECHO 3 (E112 - E120)</p>																																					
<table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>10</td></tr> <tr> <td>c_h (m²/s)</td><td>5,15E-07</td></tr> <tr> <td>c_u (m²/s)</td><td>3,43333E-07</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	10	c _h (m ² /s)	5,15E-07	c _u (m ² /s)	3,43333E-07	Comprimento (m)	20	<table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>12</td></tr> <tr> <td>c_h (m²/s)</td><td>1,97E-07</td></tr> <tr> <td>c_u (m²/s)</td><td>1,31333E-07</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	12	c _h (m ² /s)	1,97E-07	c _u (m ² /s)	1,31333E-07	Comprimento (m)	20	<table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>18</td></tr> <tr> <td>c_h (m²/s)</td><td>1,89E-07</td></tr> <tr> <td>c_u (m²/s)</td><td>1,26E-07</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	18	c _h (m ² /s)	1,89E-07	c _u (m ² /s)	1,26E-07	Comprimento (m)	20												
h _{arg} (m)	10																																								
c _h (m ² /s)	5,15E-07																																								
c _u (m ² /s)	3,43333E-07																																								
Comprimento (m)	20																																								
h _{arg} (m)	12																																								
c _h (m ² /s)	1,97E-07																																								
c _u (m ² /s)	1,31333E-07																																								
Comprimento (m)	20																																								
h _{arg} (m)	18																																								
c _h (m ² /s)	1,89E-07																																								
c _u (m ² /s)	1,26E-07																																								
Comprimento (m)	20																																								
<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>54,000</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,742</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>1,077</td></tr> </table>		U	0,900	F _s (smear)	0,503	n	54,000	F(n)	3,742	U _h	0,900	T _h	1,077	<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>36,000</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,337</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>0,960</td></tr> </table>		U	0,900	F _s (smear)	0,503	n	36,000	F(n)	3,337	U _h	0,900	T _h	0,960	<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,9</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>34,5</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,294</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,9</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>0,948164896</td></tr> </table>		U	0,9	F _s (smear)	0,503	n	34,5	F(n)	3,294	U _h	0,9	T _h	0,948164896
U	0,900																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	54,000																																								
F(n)	3,742																																								
U _h	0,900																																								
T _h	1,077																																								
U	0,900																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	36,000																																								
F(n)	3,337																																								
U _h	0,900																																								
T _h	0,960																																								
U	0,9																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	34,5																																								
F(n)	3,294																																								
U _h	0,9																																								
T _h	0,948164896																																								
<p>Cálculo sem utilização de drenos</p>		<p>Cálculo sem utilização de drenos</p>		<p>Cálculo sem utilização de drenos</p>																																					
<table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>5</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	5	T	0,848	<table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>6</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	6	T	0,848	<table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>9</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	9	T	0,848																								
H _d (m)	5																																								
T	0,848																																								
H _d (m)	6																																								
T	0,848																																								
H _d (m)	9																																								
T	0,848																																								
<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>714,67</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>1,96</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	714,67	t _{calc} (anos)	1,96	<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>2690,36</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>7,37</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	2690,36	t _{calc} (anos)	7,37	<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>6309,52</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>17,29</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	6309,52	t _{calc} (anos)	17,29																								
t _{calc} (dias)	714,67																																								
t _{calc} (anos)	1,96																																								
t _{calc} (dias)	2690,36																																								
t _{calc} (anos)	7,37																																								
t _{calc} (dias)	6309,52																																								
t _{calc} (anos)	17,29																																								
<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>		<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>		<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>																																					

Fonte: Autor, (2018)

Figura 16 – Planilha de dimensionamento para o ensaio oedométrico

 <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO ACADÉMICO DO AGreste ENGENHARIA CIVIL MARIA MARIANA AZEVEDO DOS SANTOS DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOS</p>		<p>DEFINIÇÕES DE PROJETO</p> <table border="1"> <tr> <td>Tempo aceitável (anos)</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Padrão de cravação</td><td>triangular</td></tr> <tr> <td>dm (mm)</td><td>95,77</td></tr> <tr> <td>Tipo de drenagem</td><td>radial</td></tr> <tr> <td>kh/k'h</td><td>1,5</td></tr> </table>		Tempo aceitável (anos)	1	Padrão de cravação	triangular	dm (mm)	95,77	Tipo de drenagem	radial	kh/k'h	1,5	<p>PROPRIEDADES DO GEODRENO</p> <table border="1"> <tr> <td>dw (mm)</td><td>70</td></tr> <tr> <td>ds (mm)</td><td>191,54</td></tr> </table>		dw (mm)	70	ds (mm)	191,54																						
Tempo aceitável (anos)	1																																								
Padrão de cravação	triangular																																								
dm (mm)	95,77																																								
Tipo de drenagem	radial																																								
kh/k'h	1,5																																								
dw (mm)	70																																								
ds (mm)	191,54																																								
<p>TRECHO 1 (E98 - E102)</p> <table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>10</td></tr> <tr> <td>ch (m²/s)</td><td>1,08E-07</td></tr> <tr> <td>cv (m²/s)</td><td>2,235E-08</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	10	ch (m ² /s)	1,08E-07	cv (m ² /s)	2,235E-08	Comprimento (m)	20	<p>TRECHO 2 (E102 - E112)</p> <table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>12</td></tr> <tr> <td>ch (m²/s)</td><td>2,545E-07</td></tr> <tr> <td>cv (m²/s)</td><td>2,941E-08</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	12	ch (m ² /s)	2,545E-07	cv (m ² /s)	2,941E-08	Comprimento (m)	20	<p>TRECHO 3 (E112 - E120)</p> <table border="1"> <tr> <td>h_{arg} (m)</td><td>18</td></tr> <tr> <td>ch (m²/s)</td><td>2,409E-07</td></tr> <tr> <td>cv (m²/s)</td><td>4,151E-08</td></tr> <tr> <td>Comprimento (m)</td><td>20</td></tr> </table>		h _{arg} (m)	18	ch (m ² /s)	2,409E-07	cv (m ² /s)	4,151E-08	Comprimento (m)	20												
h _{arg} (m)	10																																								
ch (m ² /s)	1,08E-07																																								
cv (m ² /s)	2,235E-08																																								
Comprimento (m)	20																																								
h _{arg} (m)	12																																								
ch (m ² /s)	2,545E-07																																								
cv (m ² /s)	2,941E-08																																								
Comprimento (m)	20																																								
h _{arg} (m)	18																																								
ch (m ² /s)	2,409E-07																																								
cv (m ² /s)	4,151E-08																																								
Comprimento (m)	20																																								
<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>27,000</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,049</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>0,878</td></tr> </table>		U	0,900	F _s (smear)	0,503	n	27,000	F(n)	3,049	U _h	0,900	T _h	0,878	<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>40,500</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,455</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,900</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>0,994</td></tr> </table>		U	0,900	F _s (smear)	0,503	n	40,500	F(n)	3,455	U _h	0,900	T _h	0,994	<table border="1"> <tr> <td>U</td><td>0,9</td></tr> <tr> <td>F_s(smear)</td><td>0,503</td></tr> <tr> <td>n</td><td>39</td></tr> <tr> <td>F(n)</td><td>3,417</td></tr> <tr> <td>U_h</td><td>0,9</td></tr> <tr> <td>T_h</td><td>0,983452681</td></tr> </table>		U	0,9	F _s (smear)	0,503	n	39	F(n)	3,417	U _h	0,9	T _h	0,983452681
U	0,900																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	27,000																																								
F(n)	3,049																																								
U _h	0,900																																								
T _h	0,878																																								
U	0,900																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	40,500																																								
F(n)	3,455																																								
U _h	0,900																																								
T _h	0,994																																								
U	0,9																																								
F _s (smear)	0,503																																								
n	39																																								
F(n)	3,417																																								
U _h	0,9																																								
T _h	0,983452681																																								
<p>Cálculo sem utilização de drenos</p> <table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>5</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	5	T	0,848	<p>Cálculo sem utilização de drenos</p> <table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>6</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	6	T	0,848	<p>Cálculo sem utilização de drenos</p> <table border="1"> <tr> <td>H_d (m)</td><td>9</td></tr> <tr> <td>T</td><td>0,848</td></tr> </table>		H _d (m)	9	T	0,848																								
H _d (m)	5																																								
T	0,848																																								
H _d (m)	6																																								
T	0,848																																								
H _d (m)	9																																								
T	0,848																																								
<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>335,9612</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>0,920</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	335,9612	t _{calc} (anos)	0,920	<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>363,437</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>0,996</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	363,437	t _{calc} (anos)	0,996	<table border="1"> <tr> <td>t_{calc} (dias)</td><td>352,150</td></tr> <tr> <td>t_{calc} (anos)</td><td>0,965</td></tr> </table>		t _{calc} (dias)	352,150	t _{calc} (anos)	0,965																								
t _{calc} (dias)	335,9612																																								
t _{calc} (anos)	0,920																																								
t _{calc} (dias)	363,437																																								
t _{calc} (anos)	0,996																																								
t _{calc} (dias)	352,150																																								
t _{calc} (anos)	0,965																																								
<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>		<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>		<p><i>t calculado < t pretendido?</i></p>																																					

Fonte: Autor, (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos do dimensionamento de geodrenos utilizando a metodologia descrita no capítulo anterior.

4.1 Coeficiente de Adensamento Médio

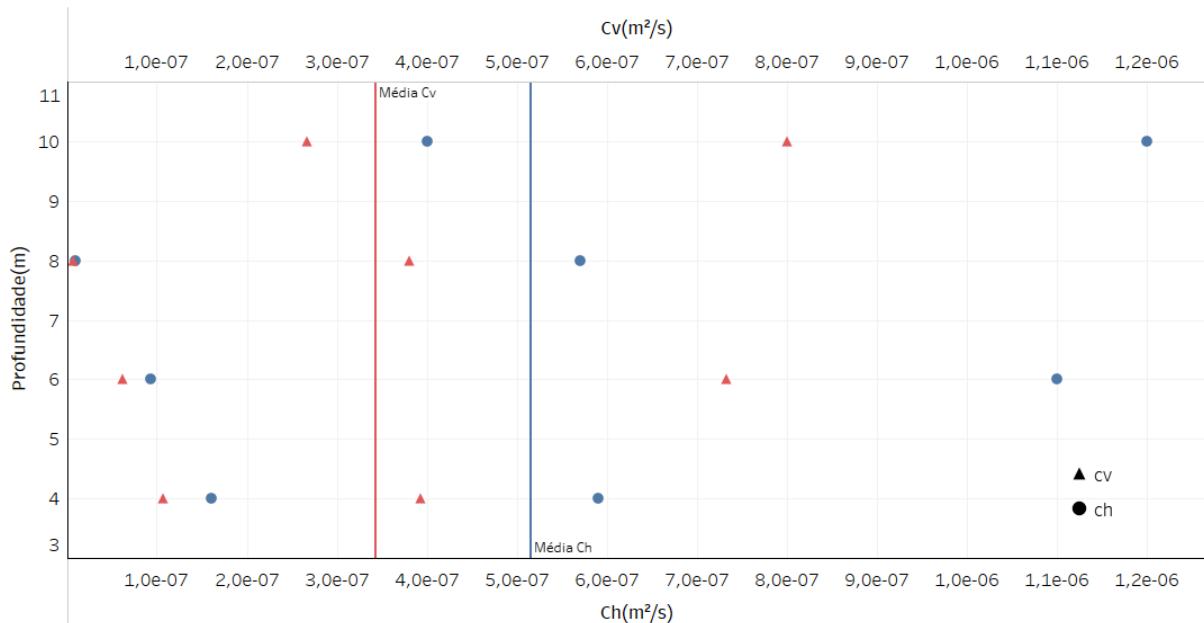
Foram determinados os valores médios do coeficiente de adensamento horizontal e vertical obtidos do ensaio de piezocone e oedométrico em relação à profundidade dos três trechos de estudo.

4.1.1 Ensaio de Piezocone

A Figura 17 mostra a variação dos valores dos coeficientes de adensamento horizontal e vertical obtidos no ensaio de piezocone para o trecho 1, que possui 10m de profundidade. Os valores médios para o c_h e o c_v foram de $5,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $3,43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

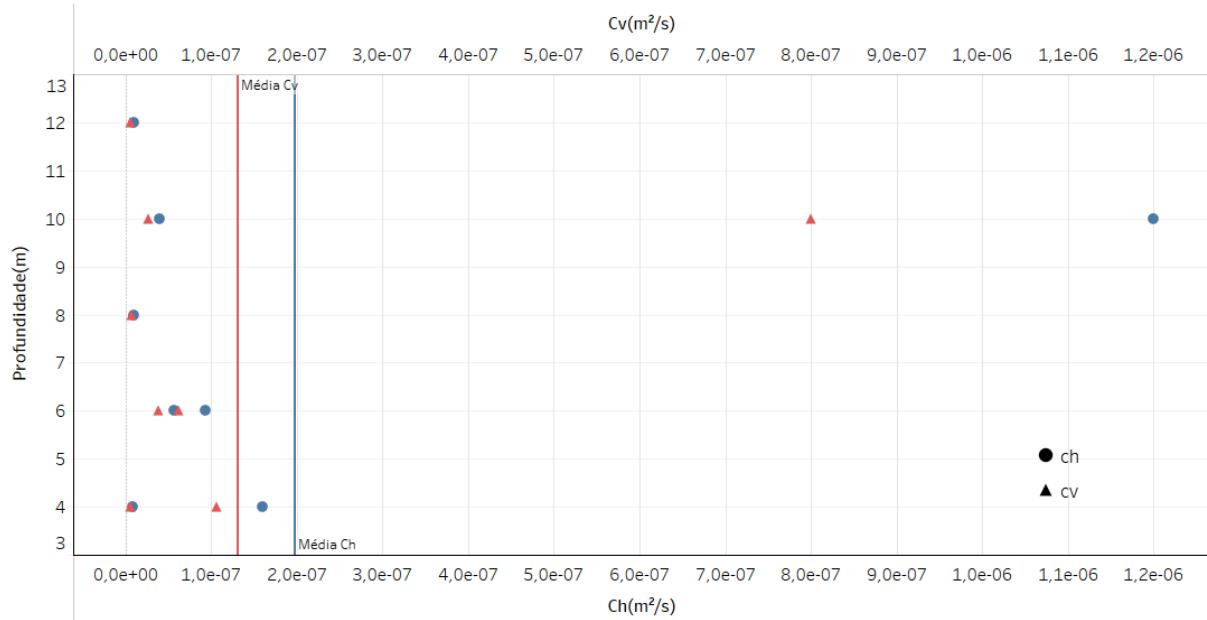
Na Figura 18 é apresentada a média dos coeficientes de adensamento para o trecho 2, e na Figura 19 para o trecho 3. O valor médio obtido no trecho 2 para c_h foi de $1,97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e para c_v de $1,31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. No trecho 3 o valor médio foi de $1,89 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para c_h e $1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para c_v .

Figura 17 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 1 obtidos do ensaio de piezocone



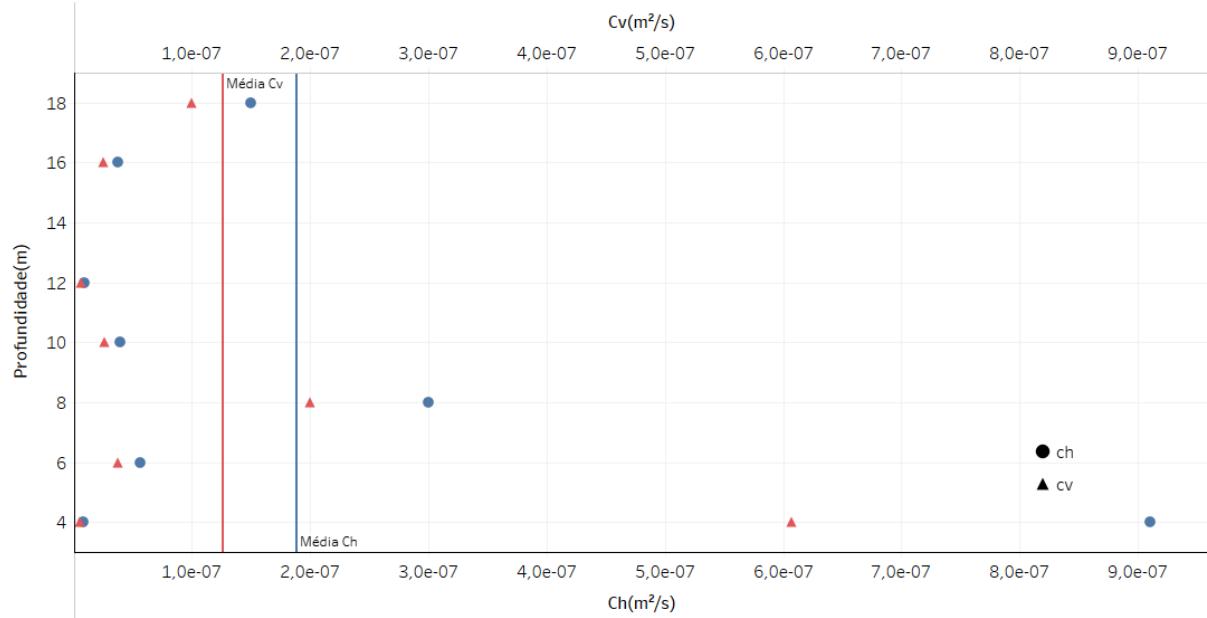
Fonte: Autor, (2018)

Figura 18 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 2 obtidos do ensaio de piezocone



Fonte: Autor, (2018)

Figura 19 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 3 obtidos do ensaio de piezocone



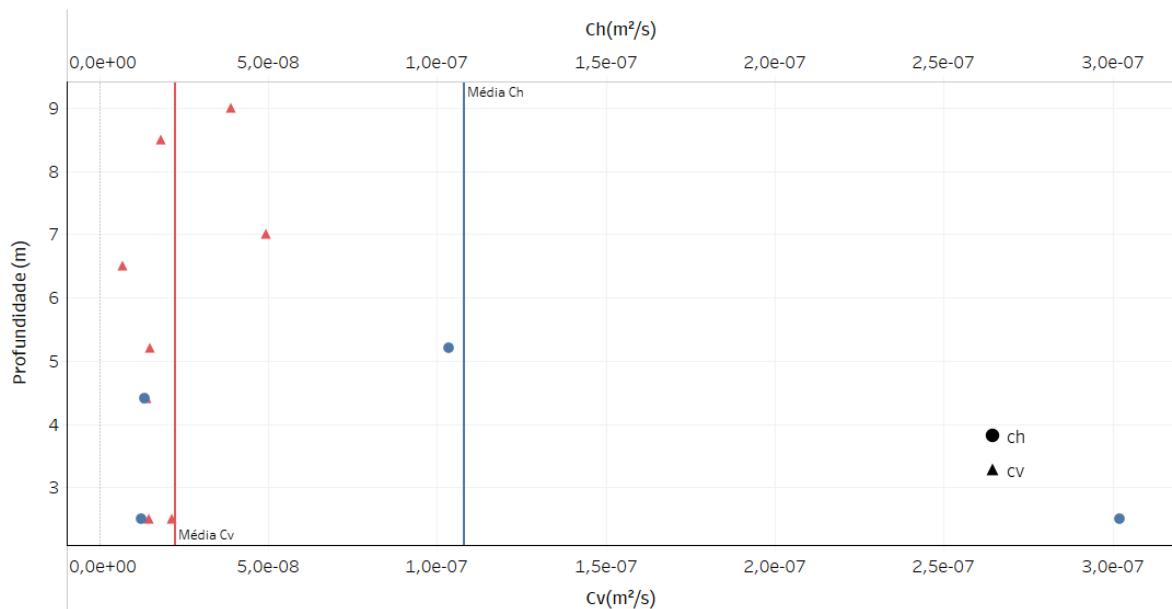
Fonte: Autor, (2018)

4.1.2 Ensaio Oedométrico

A Figura 20 mostra a média dos valores dos coeficientes de adensamento horizontal e vertical em relação à profundidade, para o trecho 1. Os valores médios para o c_h e o c_v foram de $1,08 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $2,24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

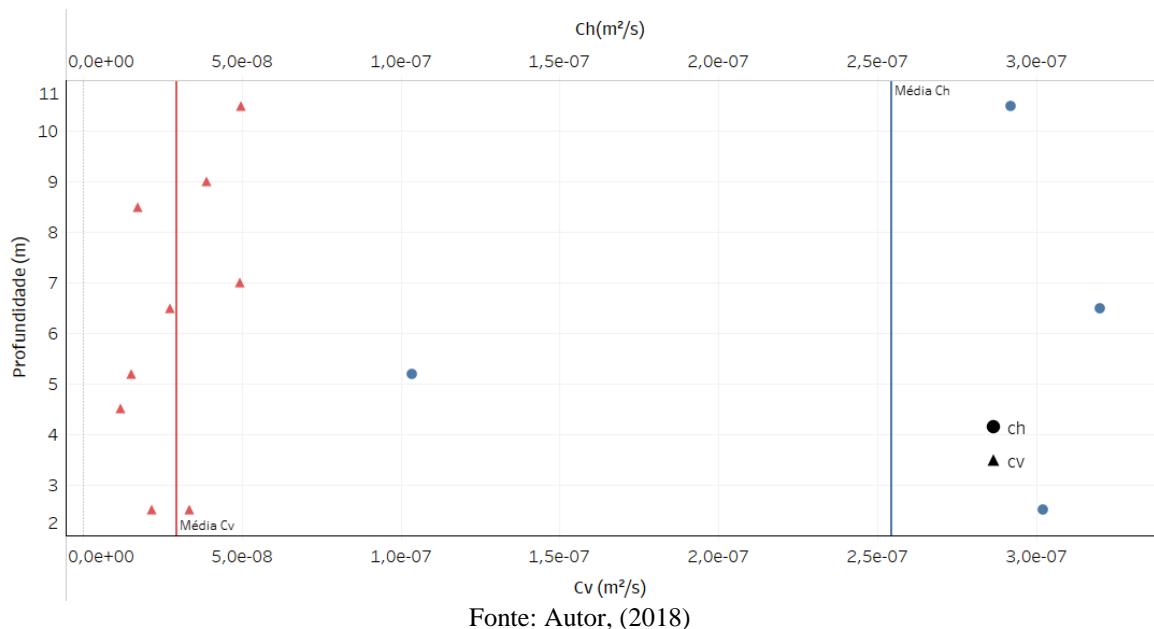
As Figuras 21 e 22 apresentam os valores médios para os coeficientes de adensamento para os trechos 2 e 3 respectivamente. No trecho 2 o resultado obtido para c_h foi de $2,54 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e para c_v de $2,94 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. No trecho 3, c_h foi de $2,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e c_v de $4,15 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Figura 20 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 1 obtidos do ensaio oedométrico



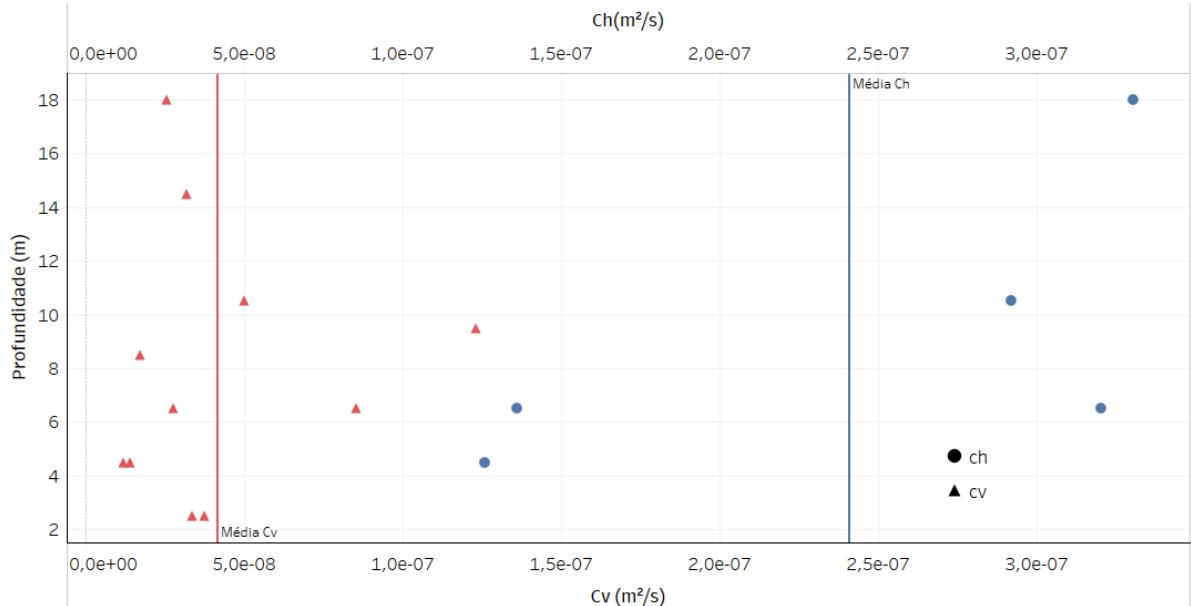
Fonte: Autor, (2018)

Figura 21 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 2 obtidos do ensaio oedométrico



Fonte: Autor, (2018)

Figura 22 – Coeficientes de adensamento médio do trecho 3 obtidos do ensaio oedométrico



amolgamento do solo (F_s). Para os cálculos foi considerado um mandril de 120 x 60 mm, e o dreno CX1000 da TDM Brasil, que possui dimensões de 100 x 40 mm. Os valores encontrados são comuns aos três trechos de estudo pois só dependem das dimensões do dreno e do mandril de cravação adotados.

Tabela 6 – Valores obtidos para d_m , d_w , d_s e F_s

Diâmetro do mandril de cravação, d_m (mm)	Diâmetro equivalente do dreno, d_w (mm)	Diâmetro da área amolgada, d_s (mm)	Amolgamento do solo, F_s
95,77	70	191,54	0,5

Fonte: Autor, (2018)

4.3 Diâmetro de influência e espaçamento entre os drenos

Para encontrar o diâmetro de influência do dreno foi necessário estimar um valor inicial para o espaçamento entre os drenos em cada trecho de estudo. A partir dessa estimativa foi possível obter o valor para o tempo de adensamento da camada de argila. O processo de cálculo consiste em tentativa e erro, pois deve-se reduzir o espaçamento até que o tempo de adensamento calculado seja inferior ao tempo de adensamento aceitável para o projeto.

4.3.1 Ensaio de Piezocone

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos a partir de uma estimativa inicial para o valor do espaçamento entre os drenos e os valores finais encontrados que atenderam às condições previstas no projeto. A partir dos valores de espaçamento foi possível calcular o diâmetro de influência do dreno (d_e), a função de densidade de drenos (F_n), o fator tempo para drenagem horizontal (T_h) e finalmente encontrar o valor para o tempo de adensamento (t_{calc}). Para os resultados encontrados foram utilizados os valores de coeficiente de adensamento do ensaio de piezocone.

Tabela 7 – Estimativa inicial e final de espaçamento entre os drenos, para o ensaio de piezocone

Trecho	L (m)		de (m)		F(n)		Th		t _{calc} (anos)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	4	3,6	4,2	3,78	3,85	3,74	1,11	1,08	1,2	0,95
2	3	2,4	3,15	2,52	3,56	3,34	1,02	0,96	1,64	0,98
3	3	2,3	3,15	2,42	3,56	3,3	1,02	0,95	1,7	0,93

Fonte: Autor, (2018)

4.3.2 Ensaio Oedométrico

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos a partir de uma estimativa inicial e final para espaçamento entre os drenos, utilizando os valores de coeficiente de adensamento obtidos do ensaio oedométrico.

Tabela 8 – Estimativa inicial e final de espaçamento entre os drenos, para o ensaio oedométrico

Trecho	L (m)		de (m)		F(n)		Th		t _{calc} (anos)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	2	1,8	2,1	1,89	3,15	3,05	0,91	0,88	1,18	0,92
2	3	2,7	3,15	2,84	3,56	3,45	1,02	0,99	1,27	1
3	3	2,6	3,15	2,73	3,56	3,42	1,02	0,98	1,34	0,96

Fonte: Autor, (2018)

4.4 Espaçamento entre os drenos: Comparaçāo entre dados obtidos por Piezocone e Oedométrico

Os resultados encontrados para espaçamento entre os drenos nos dois ensaios estão apresentados na Tabela 8. O número aproximado de drenos necessários em cada trecho também é mostrado.

Tabela 9 – Comparaçāo de resultados obtidos do ensaio de piezocone e ensaio oedométrico

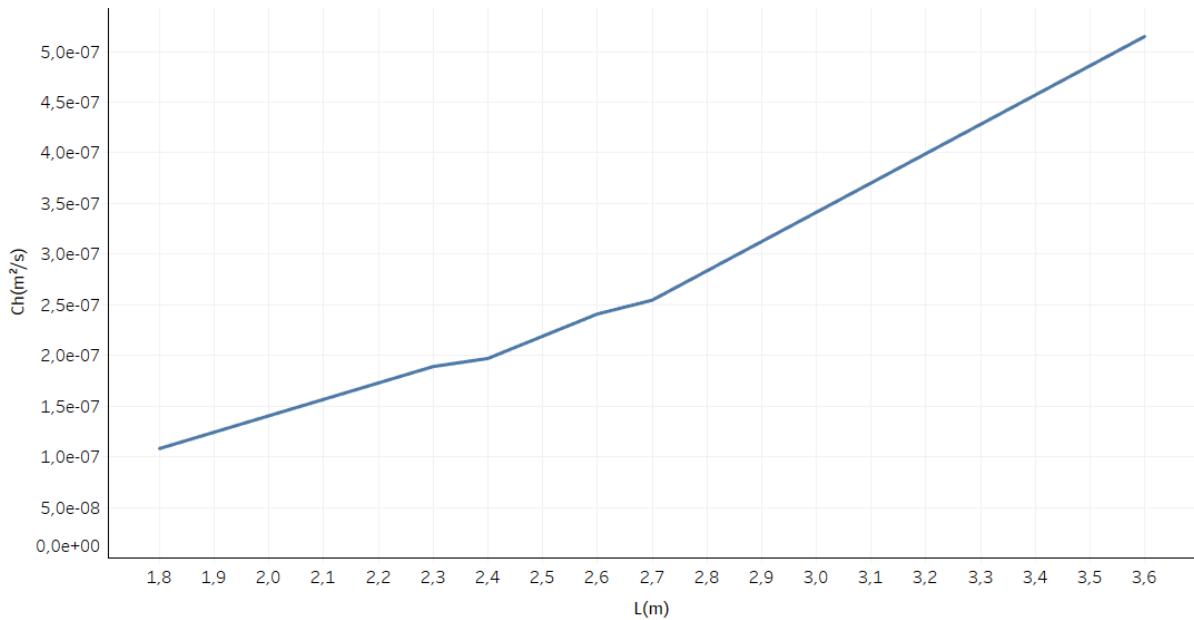
Trecho	Profundidade (m)	L(m)		N° Drenos	
		Piezocone	Oedométrico	Piezocone	Oedométrico
1	10	3,6	1,8	6	12
2	12	2,4	2,7	9	8
3	18	2,3	2,6	9	8

Fonte: Autor, (2018)

Para o trecho 2 e 3 os valores de espaçamento encontrados nos dois ensaios foram semelhantes, variando em torno de 2,5m. Para o trecho 1, os valores para o espaçamento apresentaram discrepância, sendo maiores para o ensaio de piezocone e menores para o oedométrico. A diferença entre os valores encontrados para o espaçamento é explicada devido à divergência entre os valores de coeficiente de adensamento horizontal obtidos para o trecho 1. Os geodrenos são mais eficazes quanto maior o valor do coeficiente de adensamento horizontal, pois a velocidade em que a partícula de água irá percorrer a massa de solo será maior, aumentando a distância necessária entre os drenos para obtenção do adensamento desejado e consequentemente reduzindo o número de drenos necessários.

A Figura 23 mostra a variação do coeficiente de adensamento horizontal com o espaçamento necessário entre drenos.

Figura 23 – Coeficiente de adensamento horizontal versus espaçamento entre os drenos



Fonte: Autor, (2018)

4.5 Comparação do Tempo de Adensamento com e sem uso de geodrenos

A Tabela 9 apresenta uma comparação do tempo de adensamento da camada de argila, para cada ensaio, na situação com e sem a utilização de geodrenos.

Os resultados mostram que a vantagem na utilização de geodrenos, em termos de tempo para obtenção do grau de adensamento pretendido, foi diretamente proporcional à espessura da

camada, pois quanto mais espessa a camada maior será a distância de drenagem vertical, o que irá favorecer a drenagem horizontal, resultando em um maior ganho de tempo adquirido com a utilização dos geodrenos.

Tabela 10 – Comparação do tempo de adensamento com e sem uso de geodrenos

Trecho	Profundidade (m)	tempo com uso de drenos (anos)		tempo sem uso de drenos (anos)	
		Piezocone	Oedométrico	Piezocone	Oedométrico
1	10	0,95	0,92	1,96	30,08
2	12	0,98	1	7,37	32,92
3	18	0,93	0,96	17,29	52,47

Fonte: Autor, (2018)

Em relação aos valores encontrados para cada ensaio, pode-se perceber que os valores para o tempo sem utilização de drenos foram muito maiores para o ensaio oedométrico do que para o ensaio de piezocone. Esse resultado pode ser explicado devido à diferença entre os valores para coeficiente de adensamento vertical obtidos através dos ensaios. O coeficiente de adensamento vertical médio obtido do ensaio oedométrico é cerca de 10 vezes menor que o obtido pelo ensaio de piezocone. Quanto menor o coeficiente de adensamento vertical menor será a velocidade em que a água irá percorrer a camada de argila verticalmente, favorecendo a drenagem horizontal e, portanto, será observada uma maior vantagem em termos de tempo de adensamento na utilização de drenos verticais.

Devido à divergência entre os resultados obtidos a partir do ensaio de piezocone e do ensaio oedométrico é recomendado que sejam utilizados os dados obtidos do ensaio de laboratório (oedométrico) para a realizar o dimensionamento dos geodrenos. Os ensaios de laboratório costumam apresentar valores mais precisos que os ensaios de campo por causar menos perturbação nas amostras coletadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o dimensionamento de geodrenos para um aterro sobre solo mole em Suape/PE, localizado no Complexo Industrial Portuário de Suape, a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios de laboratório (oedométricos) e de campo (piezocone). Foram considerados 3 trechos para o dimensionamento, sendo calculadas as médias dos coeficientes de adensamento e posterior espaçamento dos drenos e tempo de adensamento. Cada trecho foi analisado separadamente, sendo todos os resultados comparados.

Os resultados do dimensionamento dos geodrenos demonstram que para o trecho 2 e 3 os valores de espaçamento encontrados nos ensaios oedométricos e de piezocone foram semelhantes, variando em torno de 2,5m. Para o trecho 1, os valores para o espaçamento apresentaram discrepância, sendo maiores para o ensaio de piezocone e menores para o oedométrico.

Os geodrenos se mostraram mais eficazes quanto maior o valor do coeficiente de permeabilidade horizontal, aumentando o espaçamento entre os drenos, e consequentemente reduzindo o número de drenos necessários para obtenção do resultado desejado.

Quanto ao tempo de adensamento, os resultados mostraram que a vantagem na utilização de geodrenos, em termos de tempo para obtenção do grau de adensamento pretendido, foi diretamente proporcional à espessura da camada. Para camadas mais espessas o ganho de tempo adquirido com a utilização dos geodrenos foi maior.

Em relação aos valores encontrados para cada ensaio, pode-se perceber que os valores para o tempo de adensamento sem utilização de drenos foram muito maiores para o ensaio oedométrico do que para o ensaio de piezocone. Resultado este explicado devido à diferença entre os valores para coeficiente de adensamento vertical obtidos através dos ensaios. O coeficiente de adensamento vertical médio obtido do ensaio oedométrico foi cerca de 10 vezes menor que o obtido pelo ensaio de piezocone. Observou-se que quanto menor o coeficiente de adensamento vertical, maior a vantagem em termos de tempo de adensamento com a utilização de drenos verticais, isto porque a velocidade de adensamento vertical será menor, favorecendo a drenagem horizontal e consequentemente a eficiência dos drenos.

5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

Como sugestão de continuidade deste trabalho poderia ser realizada a análise dos recalques. Sendo este calculado para cada trecho de estudo, comparando os resultados para o ensaio de piezocone e o ensaio oedométrico, e também efetuando a comparação do recalque para a situação com e sem a utilização de drenos.

Outra sugestão é realizar o dimensionamento de drenos de areia e comparar sua eficiência em relação aos drenos de geotêxtil, objetos de estudo desta pesquisa. Para apuração de resultados com maior grau de precisão, a análise por métodos finitos poderia ser escolhida.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007** Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12069** Solo – Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro, 1991.

ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BARRON, R. A. **Consolidation of fine-grained soils by drain wells.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 73, n. 6, p. 811-835, 1948.

BELLO, M.I.M. **Parâmetros Geotécnicos e Banco de Dados de Argilas Moles: o Caso de Suape.** Tese de Doutorado. D. Sc. Thesis. Federal University of Pernambuco, 2011.

BERGADO, D. T.; CHAI, J. C.; ALFARO, M. C.; BALASUBRAMANIAM A. S. **Improvement techniques on soft ground in subsidng and lowland environment.** Netherlands: Balkema, 1994.

CARRILLO, N. **Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils.** Journal of Math. and Phys., v. 21, p. 1-5, 1942.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos.** 6º Ed. Volume 1. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1988.

COUTINHO, R. Q., **Características de Adensamento com Drenagem Radial de uma Argila Mole da Baixada Fluminense,** Tese MSc, COPPE-UFRJ, 1976.

COUTINHO, R.Q e BELLO, M.I.M, Capítulo 3 – **Aterro sobre Solo Mole, Geotecnia no Nordeste,** Gusmão.A.D., Gusmão Filho, J.A., Oliveira, J.T.R., Maia, G.B. (Org.), editora UFPE, Recife, Pernambuco, 2005.

CRAIG, R.F. **Mecânica dos Solos.** 7º Ed. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2007.

DANZIGER, F. A. B.; ALMEIDA, M. S. S.; SILLS, G. C. **The significance of the strain path analysis in the interpretation of piezocone dissipation data.** Géotechnique, UK, v. 47, n. 5, p. 901-914, 1997.

HANSBO, S. **Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains.** In: INT. ONF. ON SOIL MECH. AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Estocolmo. Proceeding... Estocolmo, 1981. v. 3, p. 677-682.

HANSBO, S. **Facts and fiction in the field of vertical drainage.** In: INT. SYMP. ON PREDICTION AND IN GEOT. ENG., 1987, Alberta, Canada. Proceedings... Alberta, 1987. p. 61-72.

HANSBO, S. **Band drains.** In: MOSELEY, M. P.; KIRSCH, K. (Eds.). Ground improvement, Chapter 1. Taylor & Francis, 2004. p. 4-56.

HOLTZ, R. D.; SHANG, J. Q.; BERGADO, D. T. **Soil improvement.** In: Kerry Rowe, R. (Ed.). Geotechnical and geoenvironment engineering handbook. Norwel: Kluwer Academic Publishers, 2001.

HOULSBY, G. T.; TEH, C. I. **Analysis of the piezocone in clay.** In: ISOPT, 1., 1988, Orlando. Proceedings...Orlando, 1988. v. 2. p. 777-783.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMAINE, J. T.; LANCELOTTA, R. **New developments in field and laboratory testing of soils” .** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGENEERING, 11., 1985, San Francisco. Proceedings... San Francisco, 1985. v. 1. p. 57-153.

LACERDA, W. A.; ALMEIDA, M. S. S. **Engineering properties of regional soils: residual soils and soft clays.** In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1995, Guadalajara. Proceedings... Guadalajara: State-of-the-art Lecture, 1995. v. 4, p. 161-176.

MOTRIZ. **MacDrain V.** Disponível em < <http://www.motrizprofissional.com.br/macdrain-v.php>>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.

OLIVEIRA, H.M., ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S. **Manual Brasileiro de Geossintéticos /** José Carlos Vertematti (coord.). – 2. Ed. – São Paulo: Blucher, 2015.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3º Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIXNER, J. J.; KREAEMER, S. R.; SMITH, A. D. **Prefabricated vertical drains.** v. 1. Federal Highway Administration, Relatório FHWA-RD-86/168. Washington, DC, EUA, 1986.

ROBERTSON, P. K.; SULLY, J. P.; WOELLER D. J.; LUNNE, T.; POWELL, J. J. M.; GILLESPIE, D. G. **Estimating coefficient of consolidation from piezocene tests.** Canadian Geotechnical Journal, v. 29, n. 4, p. 539-550, 1992.

SCHNAID, F., ODEBRECHT, E. **Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.** 2º Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SOLOTRAT. **Dreno Fibroquímico Solotrat.** Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/dreno-fibroquimico-solotrat>>. Acesso em 03 de dezembro de 2018.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1943. p. 510.

TERZAGHI, K.; FROHLICH, O. K. **Theorie der Setzung von Tonschichten** [Teoria de recalques de camadas argilosas]. Viena: Franz Deuticke, 1936.