

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

RUBA SUWIDAN

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE
EM AMOSTRAS DE SOLO MOLE REFORÇADAS COM A
INCORPORAÇÃO DE COLUNAS DE AREIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2012

RUBA SUWIDAN

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE
EM AMOSTRAS DE SOLO MOLE REFORÇADAS COM A
INCORPORAÇÃO DE COLUNAS DE AREIA**

Trabalho de Conclusão de graduação
apresentado no curso de Engenharia de
Produção Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR,
Campus Curitiba.

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

Co-orientador: Prof. M.Sc. José Luiz
Gonçalves Brandi.

CURITIBA

2012

FOLHA DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE EM AMOSTRAS DE SOLO MOLE REFORÇADAS COM A INCORPORAÇÃO DE COLUNAS DE AREIA

Por

RUBA SUWIDAN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 19 de junho de 2012, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Ronaldo Luis S. Izzo, Dr.
UTFPR

Prof. Co-Orientador – José Luíz Gonçalves Brandi, MSc.
UTFPR

Prof. Rogério K. Puppi, Dr.
UTFPR

Dedico este trabalho aos meus pais,
por me tornarem uma vitoriosa apesar de
todas as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me tornar capaz e me dar a sabedoria e a vontade de continuar quando todos os caminhos parecem estar fechados.

Ao meu pai, o meu exemplo de engenheiro nato e personificação do amor, e a minha mãe, minha rocha, companheira e porto seguro.

A minha irmã, pelo constante desafio e provocação que sempre me encorajaram a continuar e superar.

Ao meu irmão, pelo constante interesse nas minhas pesquisas e resultados e por me encorajar a ser melhor, por se espelhar em mim.

Ao Uwe Arnold, meu namorado, pelo amor, cumplicidade e patrocínio do intercâmbio

Ao prof. Dr. Ronaldo Luís Izzo, pela orientação de corpo e alma deste trabalho.

Ao prof. Mestre José Luíz Brandi, pelo interessantíssimo tema, e por despertar em mim a paixão pelo incerto e desafiador.

Ao prof. Mestre Amacin R. Moreira, pela companhia e amizade.

EPÍGRAFE

Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.

(Albert Einstein)

É preciso provocar sistematicamente
confusão. Isso promove a criatividade.
Tudo aquilo que é contraditório gera vida.

(Salvador Dali)

RESUMO

SUWIDAN, Ruba. **Determinação dos parâmetros de compressibilidade em amostras de solo mole reforçadas com a incorporação de colunas de areia.** 2012. 58. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Com o grande crescimento dos centros urbanos e, conseqüentemente, a impossibilidade de escolha do terreno com solos considerados bons. Métodos de melhoria do solo são um desafio constante e diariamente renovado para os engenheiros de fundação e os geotécnicos. Este trabalho apresenta os resultados de testes em laboratório da análise de um material dito inadequado para a construção. Amostras de solo mole orgânico incorporadas de colunas de areia com diâmetros diferentes, e avaliar os resultados para determinar a eficiência deste método como uma melhoria para o solo.

Palavras-chave: Solo mole orgânico. Colunas de areia. Melhoria de solos.

ABSTRACT

SUWIDAN, Ruba. **Determination of compressibility parameters in samples of soft soils enhanced with incorporation of sand columns.** 2012. 58. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

With the huge growth of urban centers and consequently the impossibility of choice of grounds with soils considered good. Methods of improving soil are a constant challenge and daily renewed for the foundation and geotechnical engineers. This coursework presents the results of laboratory tests of the analysis of a material said to be unsuitable for construction. Samples embedded in sand columns with different diameters, and evaluate the results to determine the efficiency of this method as an improvement to the ground.

Keyword: Soft organic soil. Sand columns. Ground improvement.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos corpos de prova	32
Tabela 2 – Umidade média do solo ensaiado	41
Tabela 3 – Resumo do ensaio de peneiramento – Solo mole orgânico	42
Tabela 4 – Resumo do ensaio de peneiramento – Areia	43
Tabela 5 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico	44
Tabela 6 – Massa específica dos grãos – Areia.....	45
Tabela 7 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 2% de Areia	45
Tabela 8 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 5% de Areia	46
Tabela 9 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 10% de Areia ...	47
Tabela 10 – Resumo das Massas Específicas das Amostras	47
Tabela 11 – Limite de Liquidez.....	47
Tabela 12 – Características das amostras	51
Tabela 13 – Comparação da deformação total das amostras	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Técnica de melhoria em função da granulometria (Mitchell, 1968).....	23
Figura 2 - Carta de Plasticidade (Pinto, 2006).....	24
Figura 3 - Local da Coleta da Amostra Indeformada.....	26
Figura 4 - Retirada da Amostra Indeformada.....	27
Figura 5 - Retirada da Amostra Indeformada.....	27
Figura 6 - Amostra Indeformada.....	28
Figura 7 - Conservação da amostra indeformada.....	28
Figura 8 - Modelação da amostra para o ensaio.....	29
Figura 9 - Amostra de solo mole orgânico.....	30
Figura 10 - Preparação da amostra para inserção da coluna de areia.....	30
Figura 11 - Amostra preparada com a coluna de areia.....	31
Figura 12 - Início do ensaio de adensamento.....	31
Figura 13 - Esquema da câmara de ensaio de compressão edométrica (Pinto 2006)	33
Figura 14 - Carregamento das amostras.....	33
Figura 15 - Série de peneiras de aberturas conhecidas (ABNT/NBR 5734/80).	37
Figura 16 - Aparelho de Casagrande	48
Gráfico 1 - Curva de Distribuição Granulométrica – Solo mole orgânico	42
Gráfico 2 - Curva de Distribuição Granulométrica - Areia	43
Gráfico 3 - gráfico determinação limite de liquidez.....	48
Gráfico 4 - Deformação Específica das Amostras.....	49
Gráfico 5 - Deformação Específica das Amostras (Repetição)	52
Gráfico 6 - Deformação específica em função da Tensão	54
Gráfico 7 - Deformação total das amostras em função da % da área carregada em areia	55
Gráfico 8 - Deformação específica das amostras em função do Carregamento	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 MÉTODO DE PESQUISA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 RECALQUE	15
2.1.1 Definições	15
2.1.2 Recalque do Solo Causado por Cargas.....	16
2.2 ADENSAMENTO	17
2.2.1 Fundamentos do Adensamento	17
2.2.2 A Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi	18
2.2.3 Ensaio Edométrico.....	18
2.2.4 Grau de Adensamento	19
2.3 SOLOS MOLES	20
2.3.1 Problemas Relacionados a Solos Moles.....	20
2.3.2 História da Melhoria de Solos	20
2.3.2.1 Tratamento de solos não coesivos.....	21
2.3.2.2 Tratamento de solos coesivos.....	21
2.3.3 Soluções Encontradas com Areia	23
2.3.4 Argila.....	24
2.3.4.1 Argila normalmente adensadas e sobreadensadas	25
3 METODOLOGIA DE ENSAIO	26
3.1 COLETA DA AMOSTRA.....	26
3.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.2.1 Corpo de Prova sem coluna de areia.....	29
3.2.2 Corpo de prova com coluna de areia	32
3.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO	32
3.3.1 Resultados dos ensaios.....	34
3.3.1.1 Índice de Vazios – Gráficos de Pressão	34
3.3.1.2 Índice de Compressão	35
3.3.1.3 Índice de Expansão.....	35
3.4 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE INICIAL.....	36
3.4.1 Teor de Umidade Inicial (h_i)	36
3.4.2 Análise Granulométrica do Solo.....	36
3.4.2.1 Ensaio de peneiramento	36
3.4.3 Determinação da Massa Específica dos Grãos	37
3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	39

3.6 QUALIDADE DAS AMOSTRAS.....	39
4 RESULTADO DOS ENSAIOS.....	41
4.1 UMIDADE INICIAL DO MATERIAL ENSAIADO	41
4.2 ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS.....	41
4.2.1 Análise Granulométrica do Solo Mole Orgânico	42
4.2.2 Análise Granulométrica da Areia	43
4.3 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS.....	44
4.3.1 Massa Específica dos Grãos do Solo mole Orgânico.....	44
4.3.2 Massa Específica dos Grãos de Areia.....	44
4.3.3 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 2% de Areia.....	45
4.3.4 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 5% de Areia.....	46
4.3.5 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 10% de Areia.....	46
4.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	47
4.4.1 Limite de Liquidez	47
4.4.2 Limite de Plasticidade	49
4.5 ENSAIO DE ADENSAMENTO.....	49
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	51
6 CONCLUSÕES	56
7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A utilização de solos moles de baixa capacidade de carga tem se tornado inevitável com o crescimento dos centros urbanos. Projetar e especificar fundações compatíveis com solo mole é um problema geotécnico que desafia engenheiros diariamente.

Considerando o fato de que moradias adequadas são um direito básico de todo e qualquer ser humano e que regiões de solos moles são geralmente ocupadas pela população de baixa renda a solução para um projeto de fundações torna-se um item muito importante tanto pelo ponto de vista técnico quanto para o econômico. Sendo assim, qualquer contribuição para uma solução geotécnica é mais do que bem vinda.

Por essas e outras razões a melhoria dos solos faz parte de muitos projetos de engenharia civil. Conseqüentemente, o estudo de novas técnicas de reforço de solos de baixa resistência com o propósito de aumentar a sua resistência e diminuir os recalques da fundação torna-se uma rotina comum em escritórios de engenharia e de pesquisadores.

1.1 OBJETIVO

A finalidade deste trabalho é avaliar a variação dos parâmetros geomecânicos de compressibilidade, nomeadamente o coeficiente de adensamento e o índice de compressão, ocorrida em solos moles a partir da incorporação de colunas de areia em amostras indeformadas submetidas a ensaios laboratoriais de adensamento unidimensional.

1.2 JUSTIFICATIVA

Levando-se em conta que uma grande porcentagem da população brasileira tem a necessidade de uma moradia adequada, e sendo o déficit de 6,5 milhões de unidade, segundo o censo IBGE 2000, qualquer solução proposta de melhoria do solo afetará o custo final. Buscando obter informações reais que atendam as

necessidades de custo/benefício foi a justificativa de se realizar um estudo que avalia as variações de rigidez de um solo mole com a introdução de colunas de areia.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

A realização do estudo será na forma de revisões bibliográficas e de literatura técnica além de ensaios em laboratórios em amostras reforçadas com colunas de areia visando à determinação dos coeficientes de compressibilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão explicados os termos relevantes técnicos para este trabalho referente a solos moles e as suas características.

2.1 RECALQUE

2.1.1 Definições

Para iniciar-se um estudo que envolve o tema recalque, torna-se importante a caracterização de solos. Solo, na engenharia civil é definido como o material que cobre a superfície da terra que pode ser removido com auxílio de pá ou picareta. Segundo Terzaghi, Peck e Mesri (1996), solo é a denominação que se dá a um agregado natural de partículas minerais, que podem ser separadas por um movimento sutil, em água. As características do solo dependem da sua região de localização já que a sua origem é principalmente do intemperismo de rochas mães (CAPUTO, 1987).

Para a engenharia de fundações solo é considerado como material de suporte de uma obra, e por isso a necessidade de conhecer as suas características e propriedades. Fatores que garantem a realização de uma obra de fundação que atenda as exigências de suporte de carga da estrutura, sem que ocorram posteriores problemas de fundação que geram grandes custos de reparo, comprometendo a segurança da construção e atraso no cronograma da obra.

Objeto principal de estudo deste trabalho, recalque é o fenômeno que ocorre quando um solo é submetido a um aumento de tensão causado pela construção de fundações. A deformação das partículas do solo, o deslocamento das partículas de solo e a expulsão da água ou do ar dos espaços vazios causam a compressão das camadas de solo e conseqüentemente o recalque. (DAS, 2007)

2.1.2 Recalque do Solo Causado por Cargas

Um dos problemas de grande ocorrência na engenharia de fundações consiste em determinar os recalques de uma construção. Segundo Caputo, 2003 o recalque do solo pode ser dividido em três categorias:

- Recalque elástico, ou também conhecido como recalque imediato: Igual a qualquer outro material o solo quando submetido a um carregamento deforma-se, este tipo de recalque ocorre predominantemente em solos não coesivos.
- Recalque por adensamento primário: Provém da variação volumétrica do solo em consequência da expulsão da água dos vazios do solo. Observado em solos coesivos, são lentos por se tratar de um material de baixa permeabilidade, argila.
- Recalque por compressão secundária ou escoamento lateral: É uma forma adicional de compressão que ocorre quando há uma pressão efetiva constante resultado de um ajuste do tecido do solo. O material tende a se deslocar da zona mais carregada para a zona menos solicitada, esse fenômeno é mais comum em solos coesivos saturados.

Exemplos clássicos de obras de engenharia que sofrem com o recalque são:

- Torre de Pisa, Itália sua fundação é do tipo superficial sobre um solo heterogêneo composto de areia argilosa, camadas de argila e areia, argila e areia. (Caputo, 2003)
- Cidade do México: Talvez o maior desafio para os engenheiros de fundação em se tratar de soluções para os problemas mais difíceis e variados. A cidade, que foi criada pelos Astecas, repousa sobre uma camada de argila muito mole com espessura de 30 m, pois, situa-se em meio de um lago. Outro fator que provoca recalque na região da cidade do México é a o constante rebaixamento do nível de água no solo gerado pela extração de grande volume de água do subsolo para o abastecimento da população. (Caputo, 2003)

2.2 ADENSAMENTO

Para determinar a compressibilidade do solo é necessário conhecer o seu índice de adensamento. O método mais conhecido para a determinação deste parâmetro é obtido pelo ensaio de adensamento lateralmente ou confinado também conhecido como ensaio edométrico desenvolvido por Karl von Terzaghi.

Entende-se por adensamento ação pelo qual os recalques acontecem com a expulsão da água do interior dos vazios do solo.

O ensaio de adensamento consiste em aplicar cargas em amostras de solo, e como qualquer outro material, o solo quando submetido a um carregamento deforma-se. Essa deformação é visualizada como a redução do volume do solo que é causada pelo reposicionamento das partículas do solo, quando a amostra é saturada a redução do volume ocorre com a expulsão da água.

2.2.1 Fundamentos do Adensamento

Quando uma camada de solo saturado é submetida a um aumento de tensão, a poropressão (pressão neutra, pressão na água dos vazios do solo corresponde a carga piezométrica da lei de Bernoulli $u = \gamma_w \cdot z_w$, z_w = altura da coluna d'água) aumenta repentinamente. Em solos de alta permeabilidade, solos arenosos, a drenagem é completada imediatamente pelo aumento da poropressão. A saída da água dos poros é acompanhada por uma redução de volume da massa do solo resultando em recalque. Nas areias, as deformações processam-se de forma praticamente instantânea, simultaneidade do adensamento, já que, devido à sua elevada permeabilidade, a água pode escoar muito rapidamente.

No caso de argilas, quando submetidas a um aumento de tensão, o recalque elástico ocorre imediatamente. Este fato se dá ao fato da condutividade hidráulica da argila ser significativamente menor do que a da areia, diferentemente da areia, as deformações processam-se com muito maior lentidão devido ao fato de a sua baixa permeabilidade dificultar a saída da água dos poros. Sendo assim, o excesso de poro pressão gerado pelo carregamento é gradualmente dissipado durante um longo período de tempo e a variação de volume associada (adensamento) na argila pode

continuar por um longo tempo após o recalque elástico e podem ser várias vezes maiores do que o recalque elástico.

Para compreender melhor o ensaio de adensamento Terzaghi considerou um modelo de um cilindro cheio de água com o topo fechado e com e uma mola ligada ao seu centro. Quando a carga P é aplicada à placa, e não é permitida a saída de água, toda a carga é suportada pela água, onde se desenvolve um excesso de pressão. Se a água puder sair, através da válvula, a placa desce e a mola é comprimida, dando-se uma transferência progressiva da carga para a mola. O processo só termina quando não existir excesso de pressão na água, ou seja, quando a carga estiver integralmente suportada pela mola.

2.2.2A Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi

A teoria de adensamento baseia-se nas seguintes hipóteses:

- O solo é totalmente saturado;
- A compressão e o fluxo d'água são unidimensionais;
- O solo é homogêneo;
- As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do solo;
- O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituídos de partículas e vazios;
- O fluxo é governado pela Lei de Darcy;
- As propriedades do solo não variam no processo de adensamento e
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

(Pinto, Carlos de Souza 2002).

2.2.3 Ensaio Edométrico

Dentro da mecânica dos solos o ensaio mais conhecido e tradicional é o ensaio de adensamento edométrico. É um dos mais importantes e hoje largamente

utilizados na determinação do recalque em solos argilosos. Neste ensaio os principais parâmetros do solo são obtidos, tais como, parâmetros de deformabilidade do solo argiloso expresso pelo coeficiente de adensamento (c_v), pelo índice de compressão (c_c) e pela pressão de pré-adensamento (p_a) que são obtidos através de construção de gráficos de curvas obtidas a partir de pontos calculados das leituras durante o ensaio.

O ensaio é muito utilizado porque é relativamente simples de realizar e porque a condição de deformação imposta é semelhante à que ocorre frequentemente nos problemas reais: o solo está impedido de romper por corte, sendo a compressão a parte dominante da deformação. No entanto, é um ensaio relativamente demorado e, à medida que as deformações verticais da amostra aumentam, geram-se forças de corte (efeito de atrito lateral) ao longo da superfície cilíndrica do corpo de prova.

2.2.4 Grau de Adensamento

O grau de adensamento é definido com a relação entre a deformação ocorrida num elemento a uma profundidade z , num determinado tempo (ε) e a deformação deste elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (ε_f).

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

A deformação final da amostra gerada pelo acréscimo de tensão pode ser obtida pela equação:

$$\Delta\varepsilon_f = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1}$$

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

$$\Delta\varepsilon = \frac{e_1 - e}{1 + e_1}$$

Substituindo as relações acima na equação de determinação do grau de adensamento temos:

$$U_z = \frac{\frac{e_1 - e}{1 + e_1}}{\frac{e_1 - e_2}{1 + e_1}} = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2}$$

Portanto conclui-se que o Grau de Adensamento nada mais é do que a relação entre a variação do índice de vazios até o instante t e a variação total do índice de vazios devida ao carregamento.

2.3 SOLOS MOLES

A expressão solo mole refere-se a solos com SPT (Standart Penetration Test) nulo ou muito baixo (SPT menor do que 2), nesses solos é comum a penetração do amostrador com o peso da composição. A ocorrência desses solos no Brasil é observada extensamente nas baixadas costeiras e se apresentam, na maioria dos casos, em camadas superficiais cuja a espessura ultrapassam 20 metros.

2.3.1 Problemas Relacionados a Solos Moles

Vários são os problemas relacionados a solos moles, o recalque de solos moles é um dos problemas mais tradicionais da engenharia civil, e em especial, da engenharia geotécnica. E várias são as solução possíveis de serem tomadas. A primeira solução a ser considerada é a remoção da camada de solo mole, porém essa solução só é viável quando se trata de camadas de relativa pequena espessura, até 5 metros, a distância de transporte não forem demasiadamente grande e a operacionalidade estiver garantida. No entanto na maioria dos casos é mais viável adotar outras soluções de melhoria do solo.

2.3.2 História da Melhoria de Solos

Quando as propriedades do solo não satisfazem as exigências de engenharia para o descarregamento adequado de cargas é necessário a medidas artificiais de modificação das características do solo. Essas melhorias garantem o

descarregamento seguro das cargas, aumento da resistência ao cisalhamento e a impermeabilidade do solo.

2.3.2.1 Tratamento de solos não coesivos

Vibroflotação

Técnica de compactação do solo que consiste em introduzir estacas de areia no terreno por vibração. Usa-se água como fluido de desagregação e estabilização do solo. O equipamento utilizado é composto por um vibrador de diâmetro de 300 a 400 mm e de comprimento em torno de 3 a 5 metros.

Estacas de Compactação

São estacas de brita e areia incorporadas ao solo por processo dinâmico visando a sua densificação e conseqüentemente a diminuição dos recalques de fundação.

Explosivos

Indicados para o tratamento de solos não coesivos saturados e de baixa resistência. Densificam o solo pela liquefação, e expulsão da água intersticial.

Injeção de Cimento

Baseia-se na injeção (incorporação com pressão) de uma calda de cimento ao solo, aumentando a sua resistência e diminuindo os recalques de fundação. Limitado a zonas de pequenos volumes e em problemas especiais em que não podem ser resolvidos por outros métodos, devido ao seu alto custo.

2.3.2.2 Tratamento de solos coesivos

Vibroflotação

Processo semelhante ao de solos não coesivos, porém o material de aterro deve ter partículas de maior tamanho do que os utilizados em solos não coesivos. Para a desagregação e estabilização dos furos usa-se água ou ar como fluido.

Tratamento Termal

Técnica que consiste em congelar e aquecer o solo da fundação. São métodos caros e complexos. O aquecimento dos grãos do solo em temperaturas moderadas maiores que 100°C com a evitação da reumidificação, eram a secagem e o aumento da resistência do solo. Para tratamento com temperaturas entre 600°C e 1000°C geram melhorias permanentes, tais como diminuição da sensibilidade à água, expansão, compressibilidade e aumento da resistência.

O congelamento artificial do solo é utilizado como reforço para a escavação abertas e fortalecimento do solo, tem aplicações temporárias. A técnica consiste em criar uma barreira para a entrada da água subterrânea. O processo de congelamento total é relativamente raro e usado apenas nos casos em que todas as outras soluções falham.

Aditivos

Usados em solos que ofereceram suportes a estruturas leves, os aditivos são tratamento primário em solos expansivos de baixa profundidade. Os principais aditivos são cimento, betume e produtos químicos.

Injeção de Compactação

É a injeção de uma mistura de solo viscoso, cimento e água em solos fracos e com alto índice de vazios. Usada para correção de recalques diferenciais e prover o escoramento em escavações abertas. O princípio de sua funcionalidade é um macaco hidráulico que comprime o solo.

A figura 1 resume as aplicabilidades dessas técnicas em função da granulometria dos solos, apresentada por MITCHELL (1968).

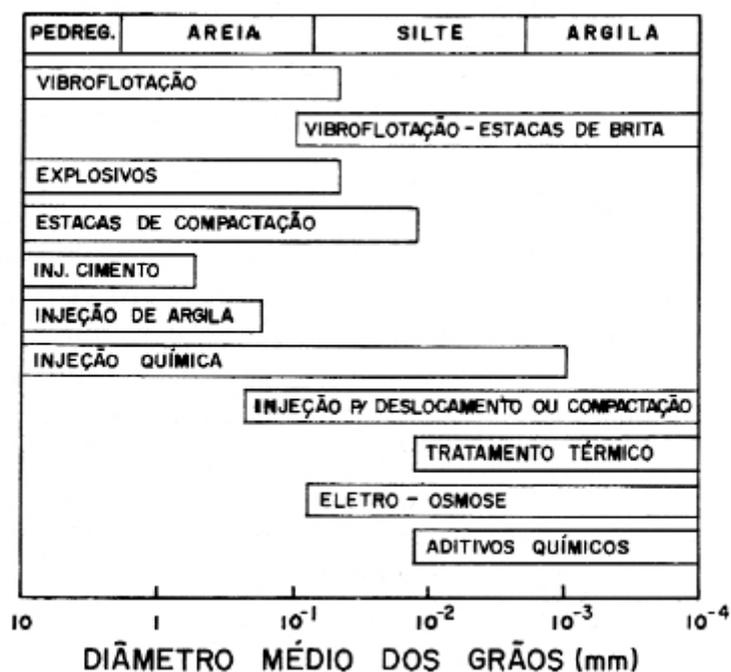


Figura 1 - Técnica de melhoria em função da granulometria (Mitchell, 1968)

2.3.3 Soluções Encontradas com Areia

A melhoria de solos com incorporação de colunas areia constitui em um processo em que colunas de área são introduzidas em solos de baixa resistência. Melhorando seus parâmetros de compressibilidade, através da inserção de materiais mais rígidos modifica as propriedades geotécnicas, tendendo a melhor a condição do material de baixa resistência.

A prática de incorporação de colunas de areia é um método de melhoria de solo já conhecido, porém, existem poucos estudos ou trabalhos sobre a variação dos parâmetros de compressibilidade deste solo modificado. A sistemática de melhoria do perfil geotécnico existente vem sendo utilizado há muito tempo. Na região nordeste do Brasil, por exemplo, é comum a melhoria da qualidade de perfis litorâneos arenosos de baixa capacidade de carga com a incorporação de estacas de compactação.

2.3.4 Argila

Torna-se importante dentro das definições que envolvem o assunto solo mole, a caracterização da argila. Argila, para a engenharia civil, é a fração fina do solo que passa na peneira nº 200 (0,075 mm). Se esta percentagem for superior a 50% o solo será considerado de granulação fina M, C ou O. (M: Silte; C: Argila e O: Orgânico).

O comportamento argiloso do solo não é apenas determinado pelo teor de argila, mas também a sua atividade. Os índices de consistência são o que melhor indicam o comportamento argiloso. (Pinto, 2006).

Plasticidade é definida como a propriedade de solos finos que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados sob certas condições de umidade.

Casagrande, analisando os índices e o comportamento de solos, observou que em um gráfico deixando o IP (Índice de Plasticidade) do solo em função do LL (Limite de Liquidez), os solos de comportamento argiloso representavam-se em pontos acima da uma reta inclinada, que tem como equação de reta:

$$IP = 0,73 \cdot (LL - 20)$$

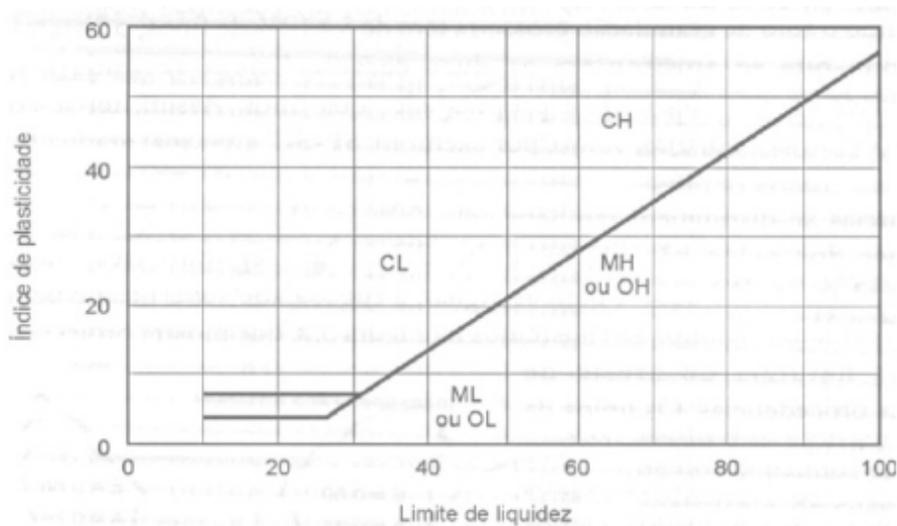


Figura 2 - Carta de Plasticidade (Pinto, 2006)

Para classificar estes solo, localiza-se o ponto correspondente ao par de valores IP e IL na Carta de Plasticidade, figura 2. A compressibilidade é uma característica complementar dos solos finos. Os solos costumam ser tanto mais compressíveis quanto maior seu Limite de Liquidez.

2.3.4.1 Argila normalmente adensadas e sobreadensadas

O termo argila normalmente adensada refere-se a argilas cuja pressão efetiva presente é a pressão máxima a que o solo foi submetido no passado.

Enquanto o termo argila sobreadensadas são aquelas que a pressão efetiva presente é inferior àquela que o solo experimentou no passado. A pressão efetiva máxima é chamada de pressão de pré-adensamento. Isto ocorre quando, eventualmente, havia uma camada de solo sobreposta à atual que teria sido removida por erosão ou, ainda, por rebaixamento do lençol freático, basicamente.

3 METODOLOGIA DE ENSAIO

3.1 COLETA DA AMOSTRA

Seguindo a proposta deste estudo, avaliar os parâmetros de compressibilidade de solos moles sem e com a incorporação de colunas de areia. O material coletado seguiu os parâmetros de coleta de amostra indeformada, isto é a retirada do solo para ensaio foi realizada de forma que a interferência no estado do solo fosse a mínima necessária para retirá-lo do local.

De onde a amostra foi retirada, no dia anterior passou uma escavadeira cortando o solo e abrindo uma passagem. O material exposto foi identificado como argila orgânica escura e de forte odor. Com o auxílio de uma espátula foi demarcada as laterais do cubo de solo a ser retirado, as figura 3, 4 e 5 mostram as condições iniciais da coleta e o sequência de retirada do bloco. A escavação foi realizada gradualmente de fora para dentro e sempre com uma margem de segurança para não danificar a quantidade necessária demarcada inicialmente.

O bloco de amostra indeformada de solo mole orgânico foi retirado de uma profundidade aproximada de um metro abaixo do nível do terreno.



Figura 3 - Local da Coleta da Amostra Indeformada.



Figura 4 - Retirada da Amostra Indeformada.



Figura 5 - Retirada da Amostra Indeformada.

Para chegar às dimensões do cubo, a metodologia adotada foi raspar o excesso em finas camadas e não cortar de uma única vez. Esse método foi adotado para evitar o cisalhamento do solo e conseqüentemente a amostra deixaria de ser amostra indeformada. Retirado o bloco de amostra indeformada, o ajuste fino para dar a forma verdadeira de um cubo foi realizado. A figura 6, a seguir, mostra a forma final do bloco retirado.



Figura 6 - Amostra Indeformada.

Já no laboratório de solos, o bloco foi conservado com parafina derretida, figura 7, e coberto com um saco plástico, com a finalidade de manter a sua umidade e características naturais até o dia do ensaio.



Figura 7 - Conservação da amostra indeformada.

3.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Quatro corpos de prova com diferentes características foram moldados. Dois na primeira semana posterior a coleta e duas semanas após a coleta. Finalizada a moldagem dos primeiros dois corpos de prova, o bloco foi novamente parafinado para garantir que a sua umidade não fosse alterada até a próxima modelagem e amostras de solo semelhante possam ser compradas.

A modelagem dos corpos de prova seguiu a metodologia abaixo.

3.2.1 Corpo de Prova sem coluna de areia

A moldagem do corpo de prova sem a incorporação de coluna de areia foi realizada uma semana após a coleta. Parte da parafina que cobria o bloco foi cortada e o anel da célula de adensamento foi posicionado para delimitar a região de corte do material. A figura 8 a seguir mostra o preparo do corpo de prova.



Figura 8 - Modelação da amostra para o ensaio.

A moldagem do corpo de prova segue a mesma metodologia de coleta da amostra indeformada. Foram utilizados materiais cortantes para formar o corpo de prova. O corte delimitador do solo é feito de fora para dentro com o mesmo cuidado

de não cisalhar a amostra. À medida que as amostra talhada foi apresentada medidas aproximada do anel, o delimitador foi levemente pressionado de forma uniforme. À medida que o anel foi introduzido no material deixou-se uma pequena sobrealtura em ambos o topo e a base para garantir a uniformização dessas superfícies.

A figura 9 mostra a condição final do preparo do corpo de prova.



Figura 9 - Amostra de solo mole orgânico.

Na figura 10 a preparação da amostra para a incorporação da coluna de areia.



Figura 10 - Preparação da amostra para inserção da coluna de areia.

Na figura 11 a seguir, a amostra com a coluna de areia pronta para o ensaio.



Figura 11 - Amostra preparada com a coluna de areia.

Em seguida, um papel filtro com o diâmetro igual ao do anel foi posicionado acima da pedra porosa dentro da célula de ensaio, o anel com amostra de solo, outro papel filtro e a segunda pedra porosa. A célula é fechada e posicionada no equipamento para a realização do ensaio, figura 12.



Figura 12 - Início do ensaio de adensamento.

3.2.2 Corpo de prova com coluna de areia

A moldagem dos corpos de prova com colunas de areia é feita da mesma forma do corpo de prova sem areia, a diferença está na incorporação da coluna de areia na amostra. Foram realizados três testes de adensamento com diferentes percentagens da área em areia. A tabela a seguir resume as características dos corpos de prova.

Tabela 1 – Características dos corpos de prova

Amostra	Diâmetro do Anel	Área do Anel	Área equivalente em areia	Diâmetro da coluna de areia
Solo natural	7,5 cm	44,179 cm ²	-	-
CP* com ± 2% da área em areia	7,5 cm	44,179 cm ²	0,88 cm ²	1,06 cm
CP* com ± 5% da área em areia	7,5 cm	44,179 cm ²	2,20 cm ²	1,67 cm
CP* com ± 10% da área em areia	7,5 cm	44,179 cm ²	4,42	2,37 cm

CP*: Corpo de Prova

Com os corpos de prova já moldados, foram abertos um círculo em cada um dos corpos de prova com os diâmetros citados na tabela 1 acima. Posicionou-se o anel dentro da célula de ensaio e em seguida o vazio foi preenchido com areia fofa.

3.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO

Este ensaio consiste na compressão do solo contido dentro de um cilindro que impede qualquer deformação lateral. O ensaio de adensamento, também conhecido assim, simula o comportamento do solo quando comprimido pelo peso de novas camadas que o sobrepõe.

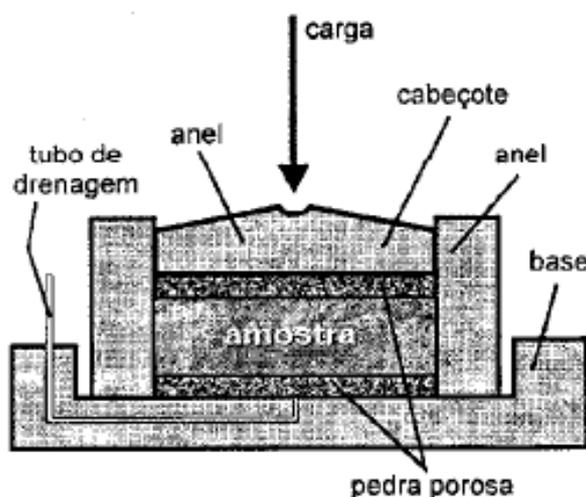


Figura 13 - Esquema da câmara de ensaio de compressão edométrica (Pinto 2006)

Para a realização do ensaio o corpo de prova do solo é colocado num anel rígido entre duas pedras porosas, uma na parte superior do corpo de prova e a outra na parte inferior que permitem a saída da água. A célula de compressão edométrica (Fig. 13) é colocada numa prensa e a carga é aplicada por meio de um braço de alavanca e a compressão é medida com um relógio amostrador. Para cada carga aplicada registra-se a deformação a diversos intervalos de tempo, até que as deformações tenham praticamente cessado, geralmente em 24 horas. Em seguida, a carga é dobrada, e conseqüentemente a pressão sobre a amostra é dobrada e as leituras para a nova tensão são novamente realizadas. A figura 14, a seguir, mostra o primeiro carregamento das amostras.



Figura 14 - Carregamento das amostras.

3.3.1 Resultados dos ensaios

3.3.1.1 Índice de Vazios – Gráficos de Pressão

Com os resultados do gráfico tempo x deformação, obtido para vários carregamentos em laboratório é necessária estudar a alteração do índice de vazios de corpo de prova com a pressão.

A seguir, um procedimento passa a passo, conforme Das (2007):

Passo 1: Calcular a altura dos sólidos, H_s , no corpo de prova de solo usando a equação.

$$H_s = \frac{W_s}{AG_s\gamma_w} = \frac{M_s}{AG_s\rho_w}$$

onde: W_s = peso seco do corpo de prova;

M_s = massa seca do corpo de prova;

A = área do corpo de prova;

G_s = peso específico relativo dos sólidos do solo;

γ_w = peso específico da água, e

ρ_w = densidade da água.

Passo 2: Calcular a altura inicial de vazios

$$H_v = H - H_s$$

onde: H = altura inicial do corpo de prova.

Passo 3: Calcular o índice de vazios inicial, e_0 , do corpo de prova.

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v}{H_s} \cdot \frac{A}{A} = \frac{H_v}{H_s}$$

Passo 4: Para o primeiro incremento de tensão, σ_1 , que provoca uma deformação ΔH_1 , calcular a alteração no índice de vazios.

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

(ΔH_1 é obtido das leituras iniciais e final do aparelho para o carregamento)

Passo 5: Calcular o novo índice de vazios após o adensamento provocado pelo incremento da pressão.

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

Para o próximo carregamento $\sigma_2 = (\sigma_2$ é igual à carga cumulativa por área unitária do corpo de prova), que provoca a deformação adicional ΔH_2 , o índice de vazios no fim do adensamento pode ser calculado como:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

Nesse momento, $\sigma_2 =$ tensão efetiva, σ'_2 . Procedendo de maneira similar, podem ser obtidos os índices de vazios no fim do adensamento para todos os incrementos de carga.

3.3.1.2 Índice de Compressão

Após a obtenção dos resultados do ensaio de laboratórios para o índice de vazios e pressão, pode-se calcular o índice de compressão do recalque de campo provocado pelo adensamento.

Para argilas indeformadas, normalmente adensadas, Skempton (1944) sugeriu a seguinte expressão empírica para o índice de compressão para argilas indeformadas.

$$C_c = 0,009 (LL - 10)$$

3.3.1.3 Índice de Expansão

O índice de expansão é muito menor do que o índice de compressão e geralmente pode ser determinado por ensaios de laboratório. Na maioria dos casos

$$C_s \cong \frac{1}{5} a \frac{1}{10} C_c$$

3.4 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE INICIAL

3.4.1 Teor de Umidade Inicial (h_i)

Para determinar a umidade da amostra foram utilizadas as aparas resultante do processo de talhagem do corpo de prova. Em três cápsulas foram colocados pequenas amostras do material, pesados em balança de precisão e em seguida postos para secar em uma estufa com temperatura regulada em 60°. Essa temperatura garante apenas a secagem da amostra sem que haja a queima do material orgânico nela presente.

3.4.2 Análise Granulométrica do Solo

Os solos na sua forma sólida são compostos por diferentes partículas de diferentes tamanhos e em diferentes proporções. Análise granulométrica do solo é a determinação do tamanho das partículas que compõem este solo e a proporções em que ocorrem. Com a separação do solo por tamanho de partícula e suas respectivas percentagens de ocorrência é possível determinar a função distribuição das partículas do solo que é denominada distribuição granulométrica.

Há duas maneiras de se obter a distribuição do tamanho dos grãos: ensaio de peneiramento, usada para materiais granulares (partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm) e ensaio de sedimentação para argila (partículas com diâmetros menores que 0,075 mm).

3.4.2.1 Ensaio de peneiramento

O objetivo do processo de peneiramento é separar as partículas sólidas solo em diversas frações. Para isso uma amostra do material é seca em estufa, seu peso é medido. A amostra então é peneirada com o auxílio de um conjunto de peneiras que possuem furos progressivamente menores, e levadas a um vibrador de peneiras onde permanecerá o tempo necessário à separação das frações.

A figura 15 mostra a sequência de peneiras e o vibrador.

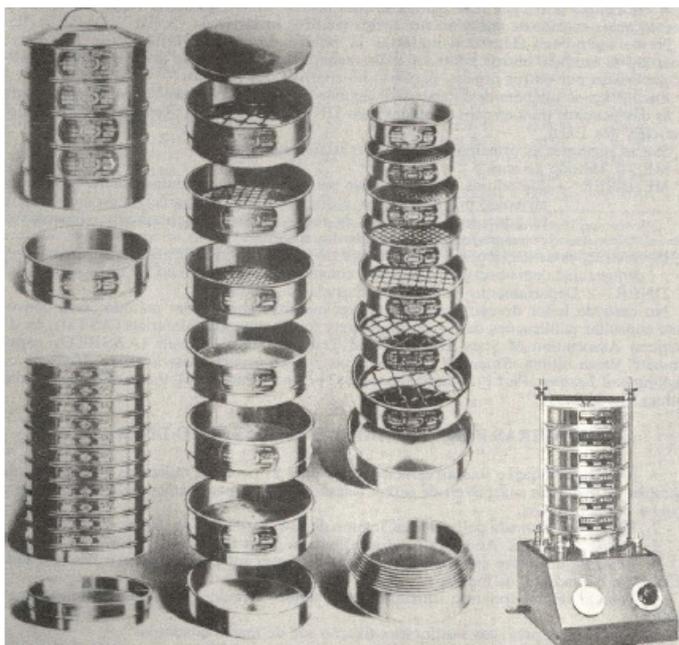


Figura 15 - Série de peneiras de aberturas conhecidas (ABNT/NBR 5734/80).

Após o término do peneiramento a massa de solo retida em cada peneira é determinada, inclusive a massa retida no fundo. A massa total do solo é determinada. Os dados coletados para a argila e para a areia estão apresentados nos itens 4.2.1 e 4.2.2 respectivamente.

3.4.3 Determinação da Massa Específica dos Grãos

Entende-se pela massa específica do solo a relação entre a sua massa e o seu volume.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

O solo é composto por três fases: material sólido, água e ar. O conjunto água e ar são conhecidos como vazios, a água pode ser eliminada com a secagem do material, no entanto o ar permanece entre as partículas sólidas. O tamanho desses vazios variam desde grande o suficiente a ponto de serem vistos a olho nu ou tão pequenos que mesmo com aparelhos de alta ampliação continuam sendo invisíveis, solos de granulação grossa e solos de granulação fina respectivamente.

O ensaio realizado para determinar a massa específica real dos grãos segue as seguintes recomendações:

- NBR 6508 (ABNT – MB – 28);
- DNER – DPT – M 93-64;
- AASHTO T – 100-54;
- ASTM D – 854-58.

Aparelhagem:

- Balança com capacidade de 200 gramas e sensibilidade de 0,01 gramas;
- Bico de gás ou outra fonte de calor;
- Estufa para secagem, capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C;
- Funil de vidro;
- Pegador de madeira;
- 3 Picnômetros com capacidade de 50 a 100 ml;
- Termômetro graduado em 0,5°C de 0°C a 100°C.

Procedimento:

Os picnômetros devem estar completamente secos para que não haja interferência nos resultados obtidos. Em seguida o peso de cada um dos três picnômetros é determinado e anotado P_{pic} .

Enchem-se os picnômetros com água destilada até a marca de referência no gargalo e pesam-se novamente e anota-se o peso de cada um $P_{pic+água}$. A temperatura é medida e anotada T_i .

Em seguida os picnômetros são esvaziados, secos e com o auxílio do funil adiciona-se uma amostra seca do solo a ser ensaiado determina-se o peso do picnômetro com o solo e anota-se $P_{pic+solo\ seco}$. Acrescenta-se água destilada ao solo no picnômetro até recobrir o material e o conjunto é aquecido até levemente ferver por aproximadamente 15 minutos tomando-se o cuidado para não deixar levantar a fervura. A finalidade de ferver o material é garantir a eliminação de todo ar aderido às partículas sólidas do solo. Em seguida os picnômetros são retirados da fonte de

calor e deixados para esfriar até a temperatura medida no começo do ensaio T_i . Após o resfriamento, acrescenta-se água destilada à mistura até a marca de referência e o peso do conjunto é novamente anotada $P_{pic+água+solo}$.

Com os dados acima obtidos é possível determinar a massa específica do solo G_s com a seguinte fórmula:

$$G_s = \frac{P_{solo\ seco}}{(P_{pic+água} + P_{solo\ seco}) - P_{pic+água+solo}}$$

3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização do material coletado serão os seguintes: Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Ensaio de adensamento.

- ABNT NBR 7180/84 - “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio”;
- ABNT NBR 6459/84 - “Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio”;
- ABNT NBR 12007/90 – “Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional – Método de Ensaio”.

3.6 QUALIDADE DAS AMOSTRAS

Os efeitos de coleta das amostras influenciam diretamente nos resultados dos ensaios, e particularmente em se tratando de argilas moles, objeto de estudo deste trabalho. A terminologia dada à perturbação sofrida pela amostra é amolgamento. Um corpo de prova é dito amolgado quando for submetido a algum grau de perturbação.

A baixa qualidade das amostras tem influência significativa nos parâmetros de compressibilidade, essa influência pode ser observada na forma da curva de compressão dos ensaios de adensamento em laboratório a partir do comportamento real em campo.

Há a possibilidade de reconstrução do gráfico índice de vazios $x \log \sigma'$, a partir dos resultados de ensaio de laboratório conforme descrito por Terzaghi e

Peck, 1967. O procedimento de correção do gráfico dependerá do tipo de adensamento da argila, argila normalmente adensada de plasticidade baixa a média ou argila sobreadensada de plasticidade baixa a média.

4 RESULTADO DOS ENSAIOS

4.1 UMIDADE INICIAL DO MATERIAL ENSAIADO

A seguir, é apresentado o resultado de ensaio de determinação da umidade inicial do solo ensaiado. O ensaio foi realizado em três amostras e obtido a média aritmética para melhor aproximação da realidade.

Para determinar a umidade do material ensaiado, às cápsulas foram secadas em estufa a 60°C. Houve a tentativa de secar o material em uma estufa de 120°C, mas devido a grande quantidade de matéria orgânica a amostra deixada nessa estufa virou apenas cinzas.

As cápsulas que continham o material foram pesadas durante dias até que o peso deixou de variar, significando a secagem completa do material. O menor tempo esperado para pesar as cápsulas foi três dias.

Tabela 2 – Umidade média do solo ensaiado

Cápsula	Peso material úmido (g)	Peso material seco (g)	Umidade h(%)	Umidade média $h_{méd}(\%)$
C1	7,18	3,93	83,63%	80,45%
C2	6,04	3,36	80,84%	
C3	6,44	3,60	78,89%	

4.2 ANÁLISE DA GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da granulometria dos materiais ensaiados.

4.2.1 Análise Granulométrica do Solo Mole Orgânico

A tabela a seguir, resume os dados coletados no ensaio de granulometria. Que são as massas retidas em cada peneira e a porcentagem dos tamanhos das partículas que compõem o solo.

Tabela 3 – Resumo do ensaio de peneiramento – Solo mole orgânico

Nº da peneira padrão americano	Abertura (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	Massa acumulada retida em cada peneira (g)	Porcentagem passante em cada peneira
4	4,75	0	0	100,00%
10	2,00	3,33	3,33	99,94%
20	0,850	200,06	203,39	78,18%
40	0,425	226,47	429,86	53,88%
50	0,297	81,97	511,83	45,08%
100	0,150	191,35	703,18	24,55%
200	0,075	108,07	811,25	12,95%
Fundo	-	120,70	931,95	-

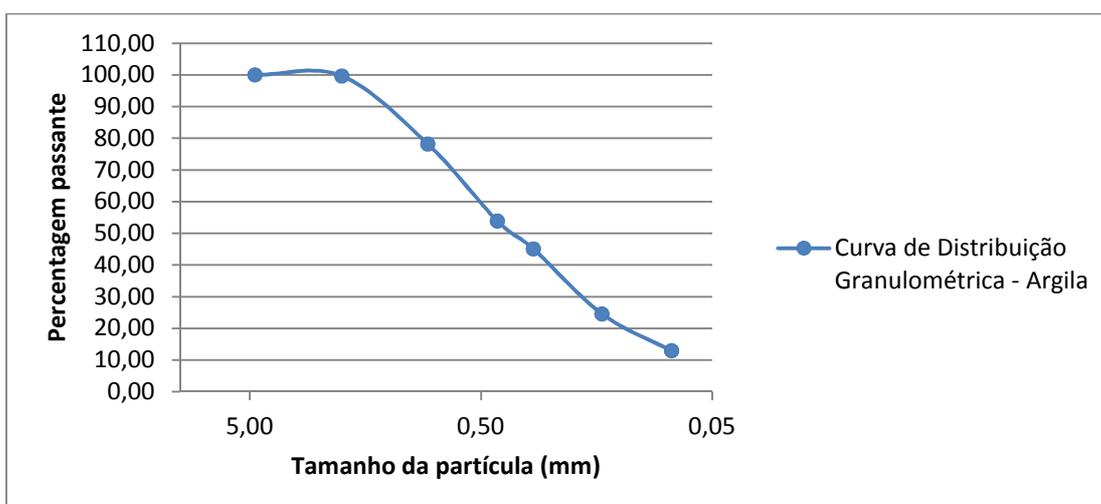


Gráfico 1 - Curva de Distribuição Granulométrica – Solo mole orgânico

O gráfico acima ilustra a curva granulométrica que define o solo mole orgânico ensaiado. Observa-se que a percentagem que definiria um material argiloso trata-se apenas de 12% de componente da amostra, sendo assim o material ensaiado é uma areia argilosa.

4.2.2 Análise Granulométrica da Areia

Tabela 4 – Resumo do ensaio de peneiramento – Areia

Nº da peneira padrão americano	Abertura (mm)	Massa retida em cada peneira (g)	Massa acumulada retida em cada peneira (g)	Percentagem passante em cada peneira
4	4,75	0	0	100,00%
10	2,00	11	11	98,85%
20	0,850	225,77	236,77	75,17%
40	0,425	323,48	560,25	41,25%
50	0,297	119,80	680,05	28,69%
100	0,150	223,53	903,58	5,24%
200	0,075	46,37	949,95	0,38%
Fundo	-	3,64	953,59	-

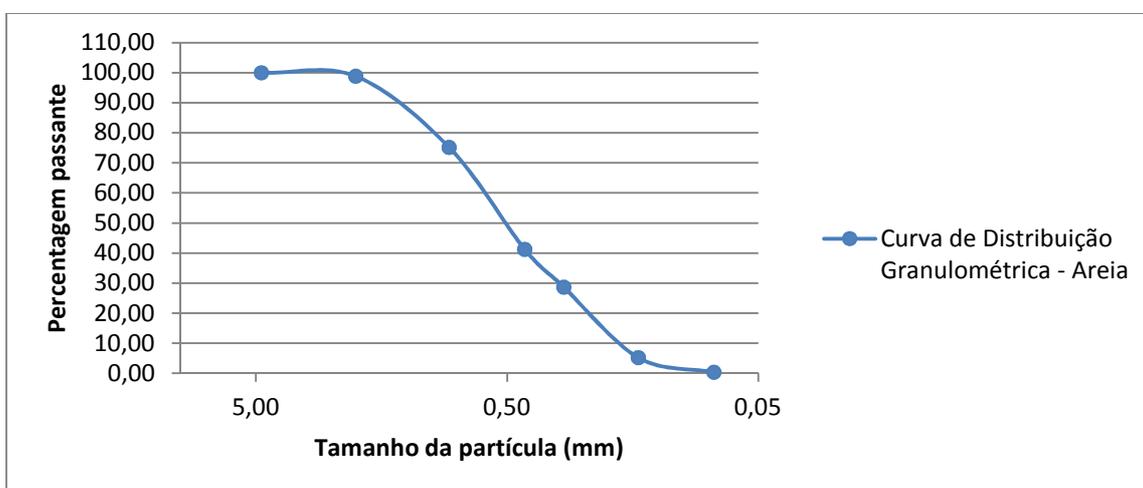


Gráfico 2 - Curva de Distribuição Granulométrica - Areia

O gráfico acima ilustra a curva granulométrica que define a areia ensaiada. Observa-se que se trata de uma areia bem graduada com faixas de distribuições bem definidas.

4.3 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

4.3.1 Massa Específica dos Grãos do Solo mole Orgânico

A tabela a seguir, resume os dados coletados e os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica da argila.

Tabela 5 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico

	P1	P2	P3
P_{Picnômetro} (g)	66,76	69,93	61,19
P_{Picnômetro + água} (g)	167,27	169,50	161,64
P_{Picnômetro + solo seco} (g)	82,82	83,34	76,73
P_{Picnômetro + água + solo seco} (g)	176,57	177,26	170,64
Temperatura (°C)	21,5	21,0	20,5
P_{solo seco} (g)	16,06	13,41	15,54
G_s(t)	2,3757	2,3735	2,3761
k₂₀ – fator de correção	0,9997	0,9998	0,9999
G_s(20)	2,3750	2,3730	2,3759
G_s(20) médio		2,3746	

4.3.2 Massa Específica dos Grãos de Areia

A seguir, a tabela resume os dados coletados e os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica da areia.

Tabela 6 – Massa específica dos grãos – Areia

	P1	P2	P3
P_{Picnômetro} (g)	66,76	68,96	61,21
P_{Picnômetro + água} (g)	167,32	169,49	161,71
P_{Picnômetro + solo seco} (g)	92,54	97,59	91,34
P_{Picnômetro + água + solo seco} (g)	183,25	187,32	180,42
Temperatura (°C)	19,0	19,0	19,0
P_{solo seco} (g)	25,78	28,63	30,13
G_s(t)	2,6173	2,6509	2,6384
k₂₀ – fator de correção	1,0002	1,0002	1,0002
G_s(20)	2,6178	2,6515	2,6389
G_s(20) médio		2,6360	

4.3.3 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 2% de Areia

A seguir, a tabela resume os dados coletados e os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica da amostra de solo mole orgânico incorporado com 2% de areia.

Tabela 7 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 2% de Areia (Contínua)

	P1	P2	P3
P_{Picnômetro} (g)	66,76	68,98	61,21
P_{Picnômetro + água} (g)	167,27	169,52	161,68
P_{Picnômetro + solo seco} (g)	80,58	83,20	77,45
P_{Picnômetro + água + solo seco} (g)	175,36	177,84	171,19
Temperatura (°C)	19	19	19
P_{solo seco} (g)	13,82	14,22	16,24
G_s(t)	2,4119	2,4102	2,4131
k₂₀ – fator de correção	1,0002	1,0002	1,0002

Tabela 7 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 2% de Areia (Conclusão)

G_s(20)	2,4123	2,4107	2,4136
G_s(20) médio	2,4122		

4.3.4 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 5% de Areia

A seguir, a tabela resume os dados coletados e os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica da amostra de solo mole orgânico incorporado com 5% de areia.

Tabela 8 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 5% de Areia

	P1	P2	P3
P_{Picnômetro} (g)	66,76	68,98	61,21
P_{Picnômetro + água} (g)	167,30	169,52	161,64
P_{Picnômetro + solo seco} (g)	78,98	80,62	74,56
P_{Picnômetro + água + solo seco} (g)	174,52	176,39	169,46
Temperatura (°C)	17	17	17
P_{solo seco} (g)	12,22	11,64	13,35
G_s(t)	2,4440	2,4403	2,4141
k₂₀ – fator de correção	1,0006	1,0006	1,0006
G_s(20)	2,4455	2,4417	2,4156
G_s(20) médio	2,4342		

4.3.5 Massa Específica da Amostra de Solo Mole Orgânico Incorporado com 10% de Areia

A seguir, a tabela resume os dados coletados e os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica da amostra de argila incorporada com 10% de areia.

Tabela 9 – Massa específica dos grãos – Solo mole orgânico com 10% de Areia

	P1	P2	P3
P_{Picnômetro} (g)	66,76	68,98	61,21
P_{Picnômetro + água} (g)	167,31	169,52	161,66
P_{Picnômetro + solo seco} (g)	78,64	82,62	78,36
P_{Picnômetro + água + solo seco} (g)	174,38	177,69	171,92
Temperatura (°C)	16	17	17
P_{solo seco} (g)	11,88	13,64	17,15
G_s(t)	2,4699	2,4936	2,4891
k₂₀ – fator de correção	1,0008	1,0006	1,0006
G_s(20)	2,4718	2,4951	2,4906
G_s(20) médio		2,4858	

Tabela 10 – Resumo das Massas Específicas das Amostras

Amostra	Solo Mole Orgânico (SMO)	SMO + 2% areia	SMO + 5% areia	SMO + 10% areia	Areia
G_s	2,3746	2,4122	2,4342	2,4858	2,6360

4.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.4.1 Limite de Liquidez

Tabela 11 – Limite de Liquidez

N° de Golpes	Umidade
55	33,64%
28	35,11%
12	35,56%

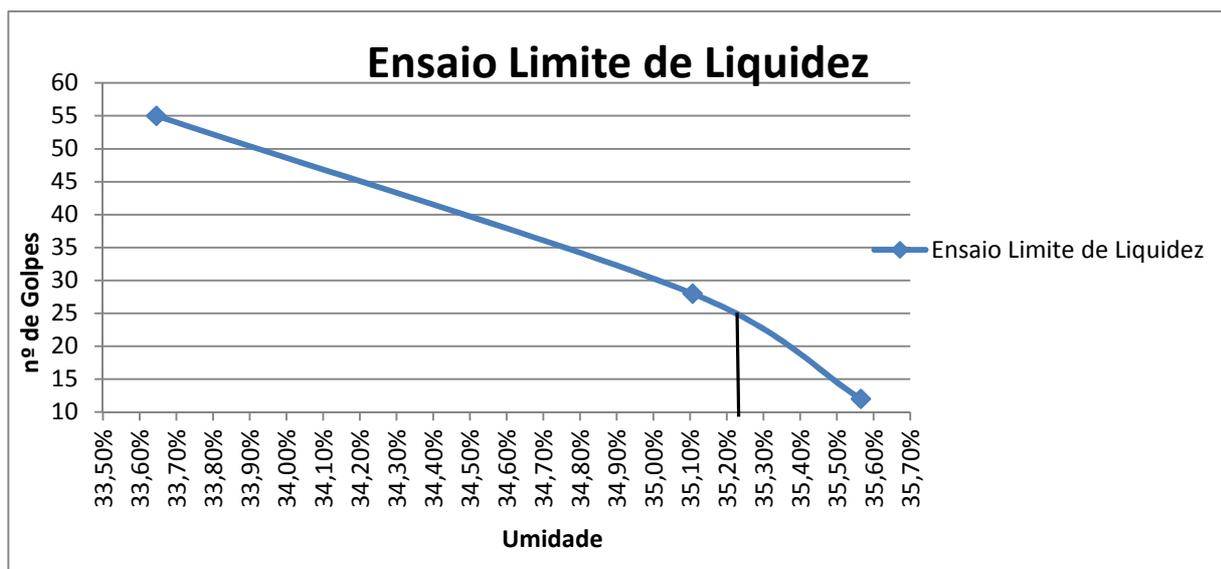


Gráfico 3 - gráfico determinação limite de liquidez

Com os dados acima é possível traçar a curva característica do limite de liquidez do material ensaiado, nº de golpes x umidade. Com base no gráfico 3 acima, é possível afirmar que o material ensaiado tem como limite de liquidez a umidade 35,22%. Esse valor é obtido no gráfico onde são necessários 25 golpes, leia-se a umidade do material. A figura 16 a seguir mostra as ferramentas necessárias para a realização dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.



Figura 16 - Aparelho de Casagrande

4.4.2 Limite de Plasticidade

Pela análise granulométrica do material ensaiado conclui-se que trata-se de um solo não plástico, pois a porcentagem de material passante na peneira #200 é de apenas 12%.

Na realização do ensaio, foi extremamente difícil modelar as amostras conforme o cilindro gabarito. As amostras se desentregavam antes de chegar ao diâmetro do cilindro e era possível sentir a granulação da areia conforme eram roladas sobre a placa de vidro.

Com base nessas duas observações é possível concluir que o material ensaiado é uma areia argilosa.

4.5 ENSAIO DE ADENSAMENTO

A seguir é apresentado o gráfico comparativo dos ensaios de adensamento, deslocamento vertical x tempo, das amostras de argila pura, amostra de argila com incorporação de 2% da área em areia, amostra de argila com incorporação de 5% da área em areia e amostra de argila com incorporação de 10% da área em areia.

As tabelas que compõem estes gráficos estão apresentadas no Anexo I deste trabalho.

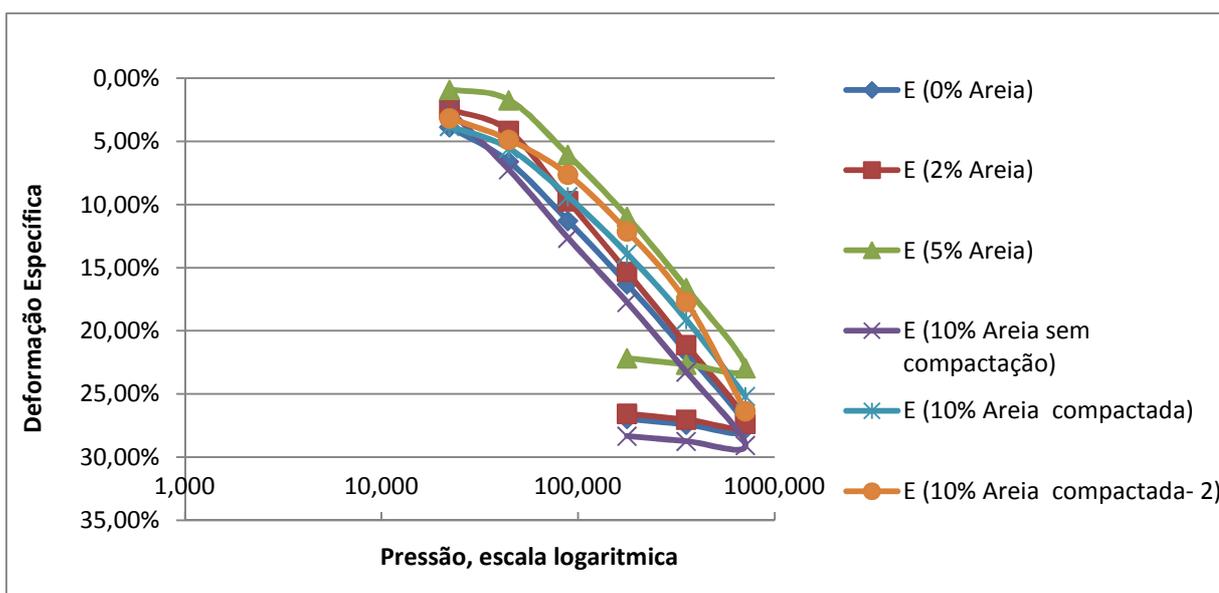


Gráfico 4 - Deformação Específica das Amostras

Ao final do carregamento total de 32 Kg, o que representa tensão superior a 710 KPa, a amostra deslocou-se no total 5,520 mm e após o descarregamento expandiu totalizando uma volta de 0,139 mm.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A princípio o meio de análise dos resultados obtidos pelo ensaio de adensamento seria pela comparação dos coeficientes de adensamento c_v e de compressão c_c , porém não será possível provar a eficiência da incorporação da areia, em virtude dos diferentes índices de vazios inicial e_0 das amostras.

A análise dos resultados dar-se-á por meio da comparação das deformações específicas sofridas por cada uma das amostras. A opção pela deformação específica como parâmetro de comparação se justifica pelo fato de que apesar das amostras serem o mesmo material, argila orgânica e areia, a incorporação de diferentes diâmetros de areia implica em índices de vazios iniciais, e_0 , diferentes e massa específica dos grão, g_s , também, diferentes. A tabela abaixo resume esses dados.

Tabela 12 – Características das amostras

Amostra	Índice de vazios inicial, e_0	Massa específica dos grãos, g_s
Argila orgânica	2,0657	2,3746
Argila orgânica com 2% da área carregada em areia	1,8498	2,4122
Argila orgânica com 5% da área carregada em areia	2,3019	2,4342
Argila orgânica com 10% da área carregada em areia sem compactação	2,0390	2,4858
Argila orgânica com 10% da área carregada em areia compactada	1,9459	2,4858

A explicação para os índices de vazios iniciais se diferem entre si é que com a incorporação de areia aumenta-se o índice de vazios inicial. Ou seja, quanto maior a percentagem de areia na amostra, maior será o índice de vazios inicial desta amostra.

O outro meio de análise e comparação das deformações específicas das amostras. Ou seja, a relação entre a altura inicial do corpo de prova e a sua altura ao final do carregamento.

$$\varepsilon = \frac{h_i - h_f}{h_i}$$

Por meio da correlação entre as curvas geradas pelos dados coletados nos ensaios de adensamento, chegou-se a uma forma de previsão de como solos moles, especificamente a argila, reagiriam ao incorporamento de colunas de areia como método de melhoria de solos. Para tanto foi analisado o índice de deformação específica. A figura a seguir, apresenta em um mesmo gráfico, os valores da deformação específica para o solo natural e solo com a incorporação de diferentes percentagens em área de areia.

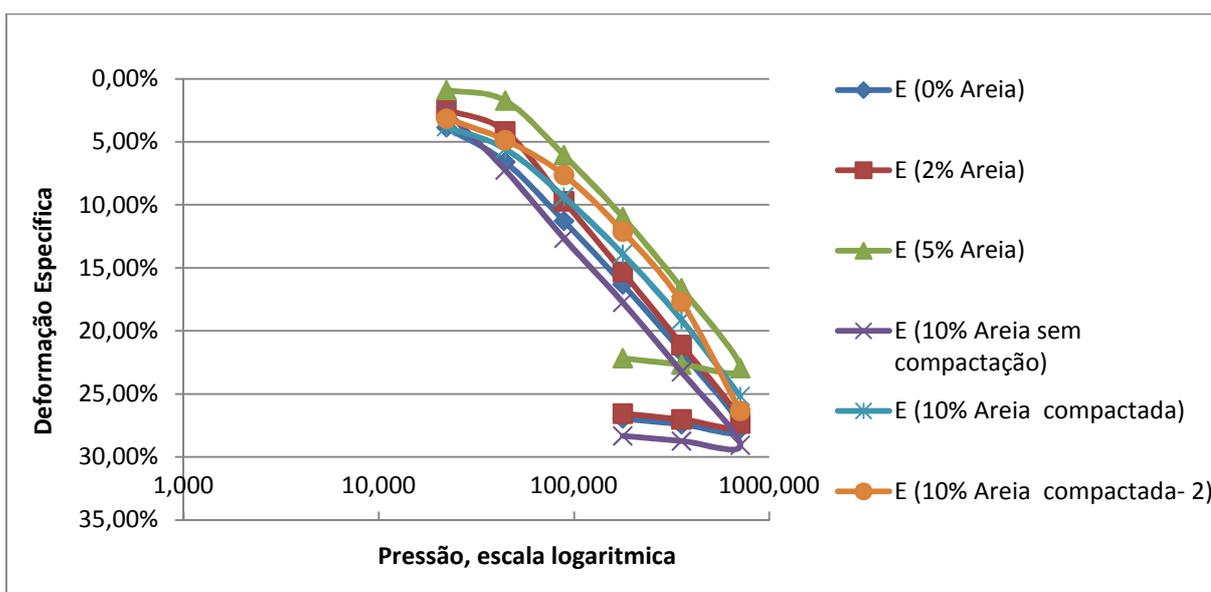


Gráfico 5 - Deformação Específica das Amostras (Repetição)

Os pontos usados nas correlações correspondem aos pontos de pressão, pontos esses que demarcam a tensão ao qual a amostra estava submetida e o quanto a amostra deformou-se desde o início do carregamento até a estabilização dos recalques.

As correlações entre a curva de adensamento da argila no estado natural e com a incorporação de areia, mostram a melhoria do solo em relação ao adensamento para a incorporação de 2% e 5% da área em areia.

Para a incorporação de 10% da área carregada em areia houve duas simulações: argila orgânica com 10% da área carregada em areia sem compactação e a segunda amostra com a incorporação da coluna de areia compactada em camadas. No entanto não foi possível avaliar se há ou não a melhoria do solo. Quando a areia é incorporada à argila sem compactação a amostra se adensa da mesma forma como a argila orgânica pura, isto é, a areia não compactada não influencia no retardamento do processo de adensamento. Os dados coletados da amostra sem compactação da areia foram desconsiderados.

Na segunda tentativa de análise, com incorporação de 10% da área carregada em areia compactada. Observou-se melhoria em relação à argila orgânica pura, porém o resultado esperado, teoricamente, deveria ser uma curva de deformação específica menor que as apresentadas pelas amostras com 2% e 5%. A base teórica que justificaria a diminuição do recalque com a incorporação de 10% em areia, se baseia no fato de que quanto maior a rigidez do material menor será o recalque.

A justificativa para a inoocorrência dessa melhoria poderia ser explicada devido ao tamanho da amostra ensaiada, anel metálico com 7,5 cm de diâmetro e 2,0 mm da altura, o diâmetro equivalente a 10% da área é 2,37 cm, ou seja, 31,6% do diâmetro do anel. Ainda poderia ser explicada pelas características do ensaio de adensamento.

O gráfico abaixo relaciona as deformações específicas sofridas por cada uma das amostras em função das diferentes tensões.

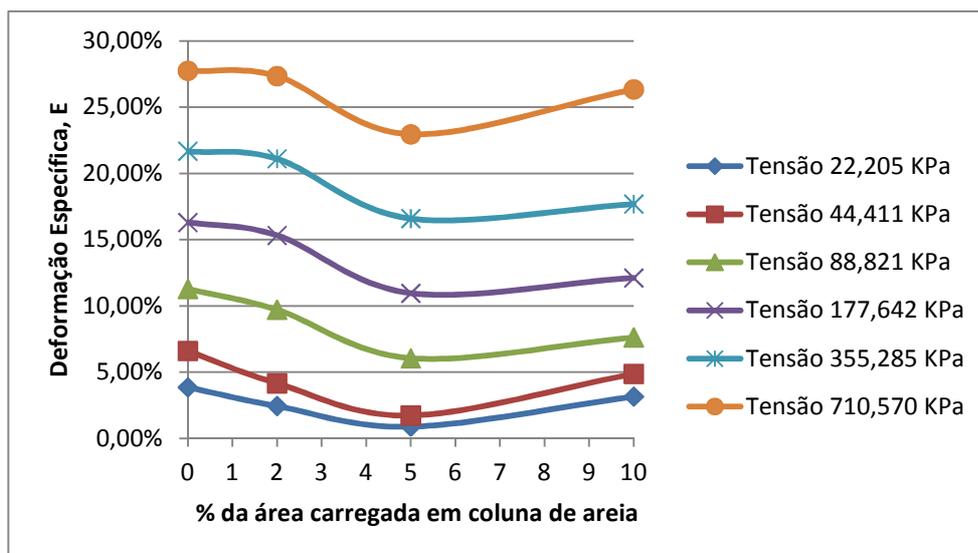


Gráfico 6 - Deformação específica em função da Tensão

Analisando o gráfico acima, percebe-se que para menores tensões houve menores reduções de deformações específicas, e vice versa, para tensões maiores houve maior redução da deformação. Esse fato ocorre devido à variação do diâmetro da coluna de areia, porcentagem de área carregada em coluna de areia, como o aumento das tensões a areia passa a ser mais solicitada, e por a areia se tratar de um material menos deformável do que o solo mole orgânico, as deformações específicas consequentemente serão menores.

No entanto, observa-se que para 10% da área carregada em areia ao invés da deformação específica ser o menor valor entre as demais deformações específicas, o valor apresentou-se como um valor maior do que o seu precedente, 5% da área carregada em areia. Supõe-se que isso ocorre devido 10% da área carregada em areia ser relativamente grande, e a coluna de areia absorver grande parcela da tensão. E imagina-se que haja uma transferência destas tensões para a lateral da coluna de areia, comprimindo a argila orgânica lateralmente, e traduzindo-se em uma menor redução da deformação específica.

O gráfico a seguir, expressa a deformação total das amostras em função da área carregada em areia.

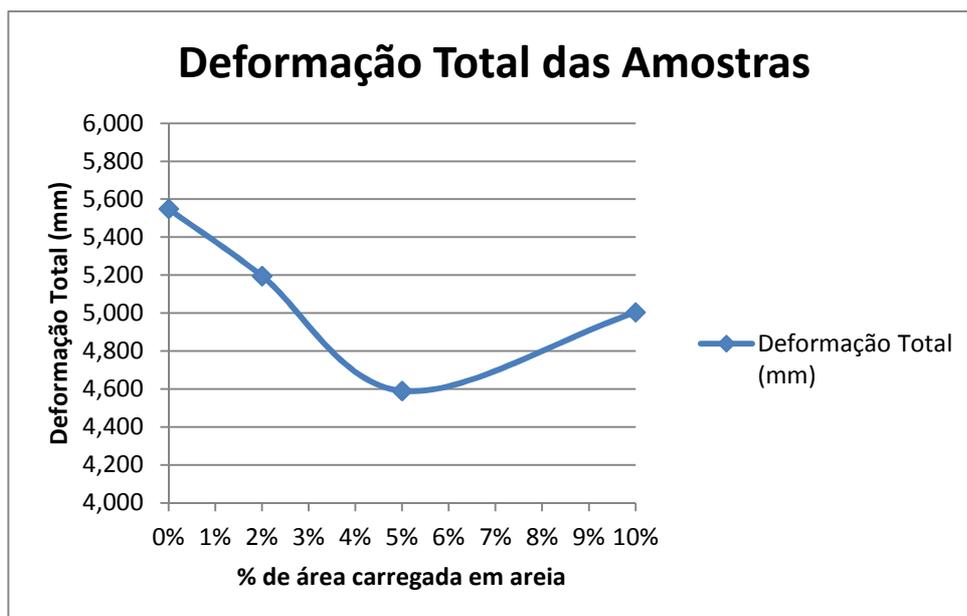


Gráfico 7 - Deformação total das amostras em função da % da área carregada em areia

Como já era esperado, a menor deformação total da amostra foi para a amostra com 5% da área carregada em areia, pois foi a amostra que teve a menor deformação específica.

A seguir, o gráfico demonstra a deformação das amostras em função do carregamento. Observa-se, novamente, que a amostra com 5% da área carregada em areia sofreu a menor deformação específica.

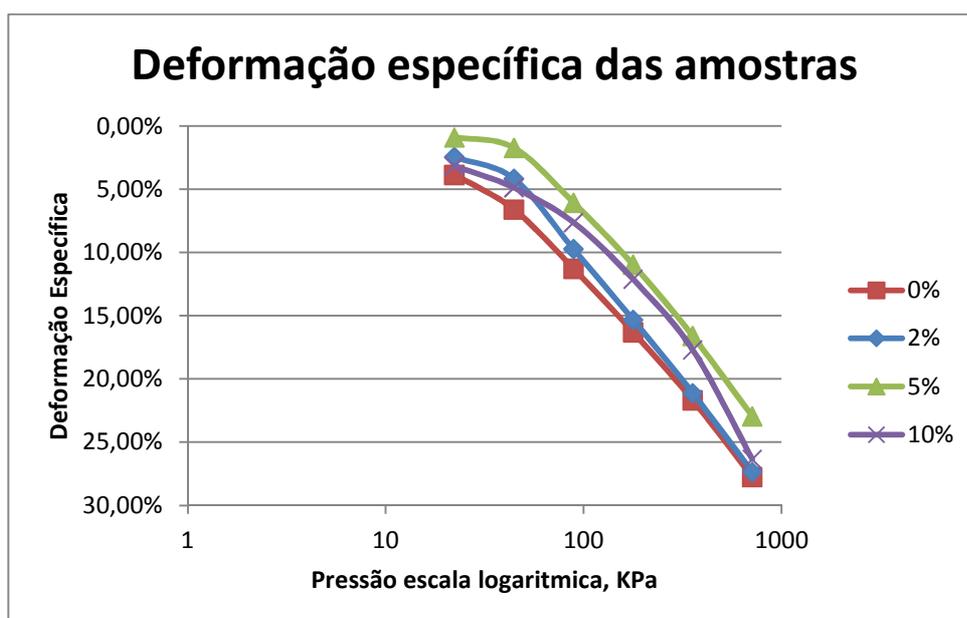


Gráfico 8 - Deformação específica das amostras em função do Carregamento

6 CONCLUSÕES

Com a análise dos dados coletados para a realização deste estudo é possível concluir que a incorporação de colunas de areia em argila orgânica é uma solução eficaz, pois é possível verificar a redução das deformações específicas com a incorporação de areia.

Tabela 13 – Comparação da deformação total das amostras

	0%	2%	5%	10%
Deformação Total (mm)	5,549	5,195	4,589	5,004
Relação do recalque	-	6,38%	17,30%	9,82%

Observa-se que com a incorporação de 2% em areia o recalque é reduzido em até 6%. Com o aumento dessa percentagem pode-se chegar a uma redução de 17%. Com 10% a redução, teoricamente, deveria ser maior, porém para verificar a veracidade desse fato o ensaio triaxial é o sugerido.

Optou-se por demonstrar essa variação de deformação em percentagem pois deste modo é possível extrapolar os resultados e determinar, por exemplo, o quanto seria o recalque em uma camada de 2 metros de profundidade.

Percebe-se que quando a percentagem da área carregada em areia se torna relativamente grande em relação ao diâmetro da amostra, essa melhoria não é confirmada, acredita-se que isso ocorre devido às distribuições laterais de tensões, que comprimem o solo mole orgânico traduzindo-se em uma menor redução da deformação específica.

O índice de vazios iniciais dos corpos de prova é alterado pela incorporação de areia, quanto maior a percentagem da área carregada em areia maior o índice de vazios iniciais e_0 e maior a massa específica dos grãos.

A variação do g_s implica na variação dos índices de vazios ao longo do ensaio. E em consequência da diferença dos índices de vazios, torna-se incoerente a comparação dos coeficientes de compressão.

7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para melhorar a qualidade dos resultados obtidos seria necessária a determinação da quantidade de matéria orgânica presente na argila ensaiada. Esse ensaio denomina-se Determinação da quantidade de sólidos voláteis.

Outro modo de avaliar o solo com a incorporação de areia seria o ensaio triaxial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR12007 – MB3336:** informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 1990. (modelo de referência com autoria coletiva).

BARROS, Pêrsio Leister de **CÁLCULO AUTOMATIZADO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO OEDOMÉTRICO:** XII Congresso Interno de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas – SP, 2004.

<http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xiicongresso/cdrom/pdfN/154.pdf>, acesso em 12.11.2011

BRANDI, José L. G., PUPPI Rogério F. e NASCIMENTO, Ney A. **Fundação em Radier Sobre Solo Mole Reforçado pela Incorporação de Colunas de Areia: Uma abordagem Teórico-Prática**, Curitiba, 2004.

BRANDI, José L. G., PUPPI Rogério F. e NASCIMENTO, Ney A. **Measured Settlements of Mat Foundations on Soil Clay, with and without Reinforcement from Sand Columns**, Curitiba, 2004.

BRANDI, José L. G. e NASCIMENTO, Ney A. **Clay Soil Reinforcement for a Superficial Mat Foundation**, Curitiba, 2005.

BRANDI, José L. G. **Radier Reforçado**, Revista Técnica, Edição 176, 2011.

DAS, Braja M. **Fundamento da engenharia Geotécnica**, tradução da 6ª ed norte Americana, editora Thomson Learning, 2007 562p.

Girmscheid, Gerhard **Bauverfahren des Spezialtiefbaus:** Livro texto (em alemão) da disciplina Método Construtivo de Construções Profundas da Universidade ETH-Zürich, Zurique, 2006.

MITCHELL, J.K. **In-place treatment of foundations soils. In: SPECIALTY CONFERENCE ON PLEACMENT AND IMPROVEMENT OF SOIL TO SUPPORT STRUCTURES**, USA, ASCE (1968).

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**, 3. Ed. Rio de Janeiro: Terratek.

SANDRONI, Sandro S **Sobre a Prática Brasileira de Projeto Geotécnico de Aterros Rodoviários em Terrenos com Solos Muito Moles:** É apresentado um conjunto de observações práticas sobre o projeto geotécnico de aterros rodoviários, construídos sobre solos muito moles. São abordados aspectos referentes à prospecções geotécnicas e alternativas de projeto. (sem data)

SOARES, Cartaxo Wilson **Estacas de Compactação para Melhoria de Solos:** Dissertação de mestrado apresentada à escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2002.