2
Revisão Bibliográfica

2.1. Aterros construídos sobre depósitos de argilas moles

A construção de um aterro sobre solos moles constitui-se num desafio para o controle dos recalques e da estabilidade, devido à alta compressibilidade e a baixa resistência destes tipos de solos. O melhoramento destes solos é fundamental para o desenvolvimento de muitos projetos.

A projeção de uma técnica de melhoramento de solos moles deve ser apropriadamente estudada com informação suficiente e de boa qualidade, obtida tanto em ensaios de campo como de laboratório, além de um seguimento a etapa construtiva com métodos observacionais de instrumentação de campo (placas de recalque, inclinômetros, piezômetros, etc.) que permitam ter um completo controle, tendo em conta os riscos envolvidos, entre os quais se destacam:

- Recalques superiores aos projetados podem produzir nas estruturas fissuras ou inclinações e até comprometer a estabilidade.
- O período para o melhoramento do solo, quando for superior ao previsto pode produzir atrasos na programação da obra e consequentemente trazer problemas financeiros para o projeto.
- Maiores recalques que os projetados pode levar a um volume maior de aterro, o que pode afetar o orçamento do projeto.

Os ensaios de laboratório, ainda que tenham uma serie de limitações, são uma das principais metodologias usadas para o conhecimento das características dos solos, as quais ao serem confrontadas com as características obtidas em ensaios de campo fornecem informações fundamentais para a projeção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.2.
Breve descrição das técnicas de melhoramento de solos moles

Existem diferentes técnicas para o melhoramento de solos moles, a seguir são descritas:

2.2.1.
Carregamento com aterro

Um material compactado para aterro pode ter um peso específico ao redor de 18kN/m^3. Somente uma camada de aterro de 3m de altura gera na superfície do solo uma pressão de 54kPa (5.40tf/m^2) o que pode equivaler a uma carga transmitida por uma sapata de um prédio de 4 andares. Em conclusão é uma carga bastante considerável.

O princípio de como um carregamento com aterro melhora as características de um solo é explicado a seguir:

A tensão total (σ_T) em um solo saturado antes de ser carregado $((tempo)\ t = 0^-)$, esta dada pela equação:

$$\sigma_T = \sigma' + u$$

Onde;

σ' é a tensão suportada diretamente pelos grãos do solo conhecida como tensão efetiva.

u é a pressão no interior dos poros cheios de água (poro pressão).

Uma vez que o solo é carregado $(t = 0^+)$, a pressão gerada pelo peso do aterro (Δp) é imediatamente suportada pela água no interior dos poros do solo, gerando um excesso de poro pressão (Δu), a tensão total no solo passa a ser:

$$\sigma_T + \Delta p = \sigma' + (u + \Delta u)$$

Onde

$$\Delta u = \Delta p$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Esta pressão é transmitida aos grãos do solo, ao longo do tempo, à medida que a água do interior dos poros do solo vai drenando para fora da camada.

No $(t = \infty)$ o excesso de poro pressão Δu é totalmente dissipado e transmitido em totalidade aos grãos do solo, finalmente a tensão total do solo é,

$$\sigma_T + \Delta p = (\sigma' + \Delta\sigma') + u$$

Onde

$$\Delta\sigma' = \Delta p$$

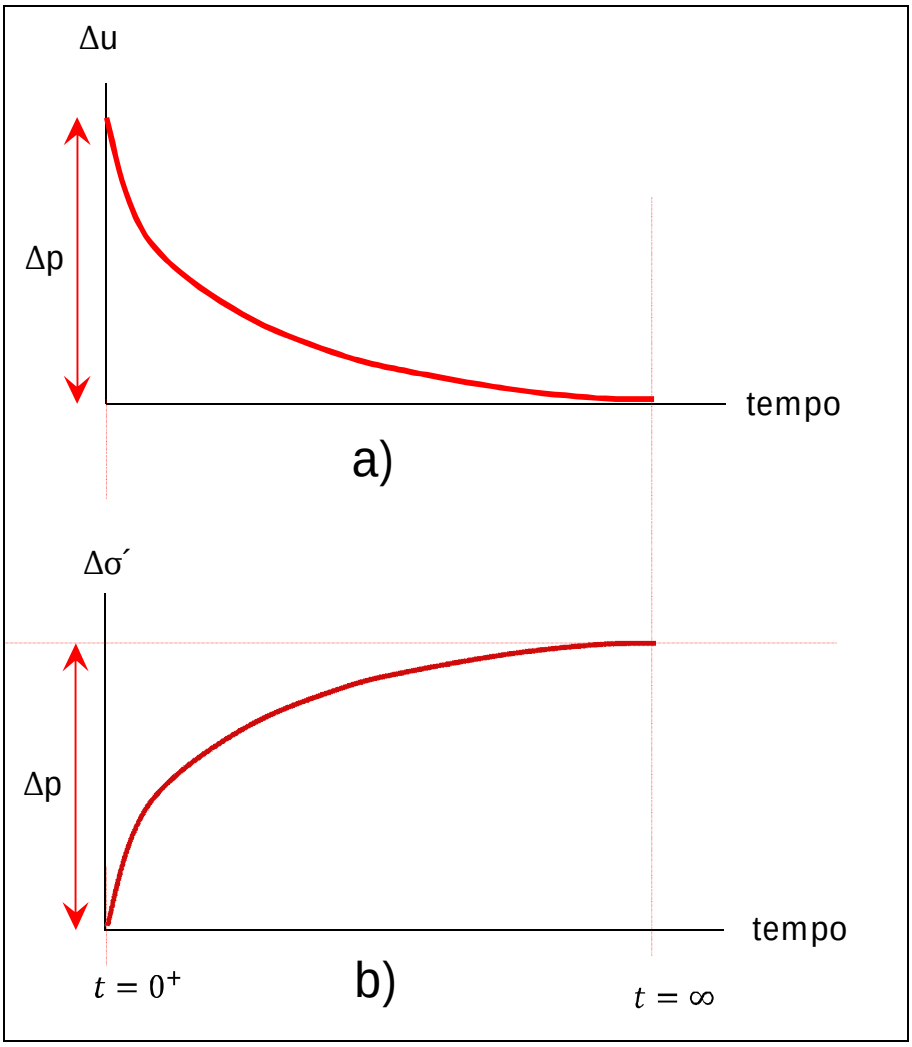


Figura 2.1 - Variação ao longo do tempo, em um processo de carregamento com aterro, a) do excesso de poro pressão, b) da tensão efetiva.

Na Figura 2.1 são apresentadas curvas de variação do excesso de poro pressão e de tensão efetiva ao longo do tempo. O volume que ocupava a água que saiu do solo no processo de dissipação de poro pressão (adensamento) é um volume que a camada de solo perde o que se reflete em recalques, assim os grãos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

de solo ficam mais perto uns dos outros, o que faz com que a resistência do solo seja maior, com o tempo.

Este processo de adensamento depende diretamente da permeabilidade do solo. As argilas apresentam baixa permeabilidade, o que faz com que o tempo de adensamento tenha uma duração importante. Dependendo do projeto e do solo pode ser de vários meses.

Vantagens:

- É o método mais amplamente usado e conhecido o que gera confiança para a sua aplicação;
- São usados equipamentos convencionais para movimento de terra.

Desvantagens:

- Tempos consideráveis para o cronograma da obra;
- Depende da disponibilidade do material;
- Precisa-se de boas vias entre a jazida do material e a obra;
- Depois de atingidos os recalques projetados o material usado para o carregamento adicional precisa de um lugar para disposição;
- É necessário estender horizontalmente o aterro fora do perímetro do aterro definitivo da obra, o que pode não ser possível em algumas obras;
- Deve ser estudada e garantida a estabilidade do aterro, dependendo do projeto podem ser usadas bermas de estabilização ou execução do aterro por etapas.

2.2.2. Carregamento com aterro junto com o uso de drenos verticais para aceleração de recalque

O uso de drenos verticais não aumenta o valor do recalque, mas faz com que os tempos de adensamento por carregamento com aterro sejam menores, ao oferecer uma rota adicional de drenagem que aproveita a permeabilidade horizontal do solo, a qual em vários tipos de depósitos de solos é maior que a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

permeabilidade vertical. Além de oferecer distâncias de drenagem, menores. Um espaçamento entre drenos comum pode ser 1.5m, o que oferece uma distância de drenagem de 0.75m que pelo geral é bem menor que a metade da espessura da camada (menor distância de drenagem vertical).

Figura 2.2 - Equipamentos instalando drenos verticais, Kirstein 2007

Vantagens:

- Melhora muito os tempos de adensamento de um carregamento com aterro.
- É uma técnica que tem sido usada em vários projetos com sucesso o que ajuda na hora de decidir ser usada.

Desvantagens:

- O equipamento para sua instalação não é um equipamento tradicional o que pode limitar o uso.
- O equipamento para a instalação dos drenos é um equipamento grande, sendo assim o projeto precisa ter uma área importante para cobrir os custos de transporte deste equipamento, ver Figura 2.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.2.3.
Colunas granulares

É um sistema de reforço do solo mole com colunas de solo granular (brita ou areia) com ou sem camisa geotêxtil. Estas colunas tem um funcionamento mais de tratamento massivo do que um sistema de transferência de carga para camadas inferiores. Também funcionam como drenos verticais.

Existem diferentes métodos de execução das colunas granulares em uso no Brasil:

1. Vibro-substituição a seco: este método não gera resíduos, mas gera deslocamentos horizontais e levantamento da área tratada, no caso de solos muito moles pode gerar embarrigamentos.

2. Pré-furo com hélice: seguido de inserção de tubo de aço com ponta aberta ou fechada. O pré-furo gera resíduos que precisam de transporte e disposição final.

3. Furo com ponta fechada: Colunas sem camisa são executadas com tubo de ponta fechada (com ou sem pré-furo). Quando há risco de se gerar embarrigamentos usa-se camisa.

A Figura 2.3, apresenta graficamente o processo construtivo de uma coluna granular com um vibrador de ponta fechada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

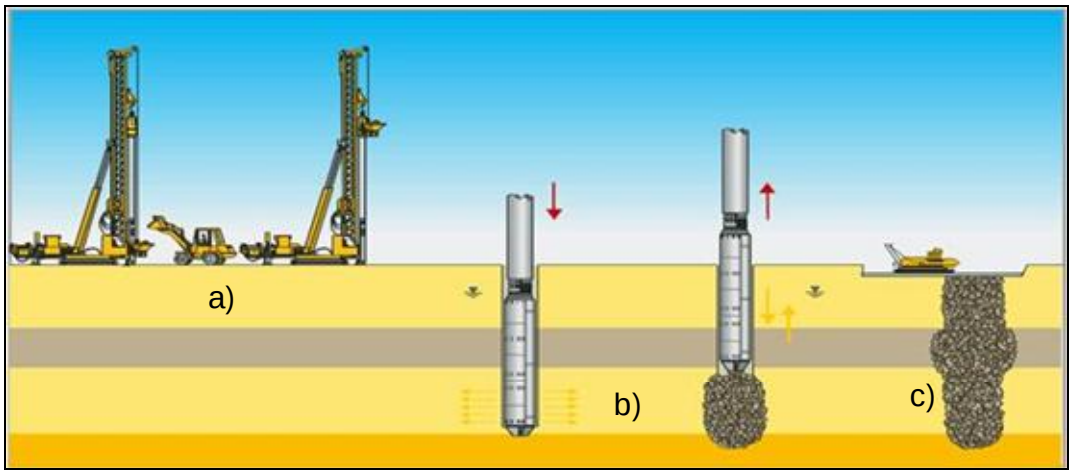


Figura 2.3 - Execução de colunas granulares com vibrador profundo, (Referência: site da Keller).

a) A caçamba do equipamento é abastecida com brita

b) Vibrador profundo penetra no solo. A medida que vai subindo vai depositando e vibrando brita no solo.

c) Coluna granular pronta

Figura 2.4 - Equipamento com vibrador profundo para execução de colunas granulares, Sandroni, 2012.

Vantagens:

- Menores tempos de melhoramento de solos.

Desventagens:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

- No caso do método com pré-furo a geração de resíduos precisa de transporte e disposição final.
- O equipamento para a execução das colunas granulares é especial, não é convencional, o que pode limitar o uso desta técnica pela disponibilidade do equipamento.
- O equipamento é de grande porte, pelo qual a área do melhoramento deve ser grande para dividir os custos de transporte deste equipamento. Ver Figura 2.4.
- A profundidade em que se encontra a camada de solo mole pode ser uma limitante, ainda mais se esta camada não estiver na superfície.

2.2.4. Mistura com cimento seco (STABTEC ou Dry Mix)

Esta técnica consiste em misturar a camada de solo mole que deve encontrar-se na superfície com cimento seco. O cimento reage com a água contida no solo endurecendo a mistura. A presença de cloretos e/ou sulfatos pode retardar ou inibir a reação do cimento com a água, o uso de aditivos pode ajudar a enfrentar estas situações. Na Figura 2.5 é apresentado um esquema geral do processo de execução desta técnica.

Vantagens

- Tempo de melhora do solo mole inferior ao tempo usando a técnica de carregamento com aterro;
- A camada tratada chega a ter uma compressibilidade muito baixa.

Desvantagens

- A homogeneidade depende da habilidade do operador;
- A camada a ser tratada deve ser superficial;
- A profundidade é limitada pela capacidade do equipamento de alcance e de força de rotação da cabeça injetora;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

- É importante medir a resistência do solo ao final do tempo de reação do cimento, para o qual é necessário fazer ensaios penetrométricos (SPT, CPT, etc.) ou levantamentos geofísicos;

- Dependendo do projeto geralmente é uma técnica custosa comparada com a técnica de carregamento com aterro.

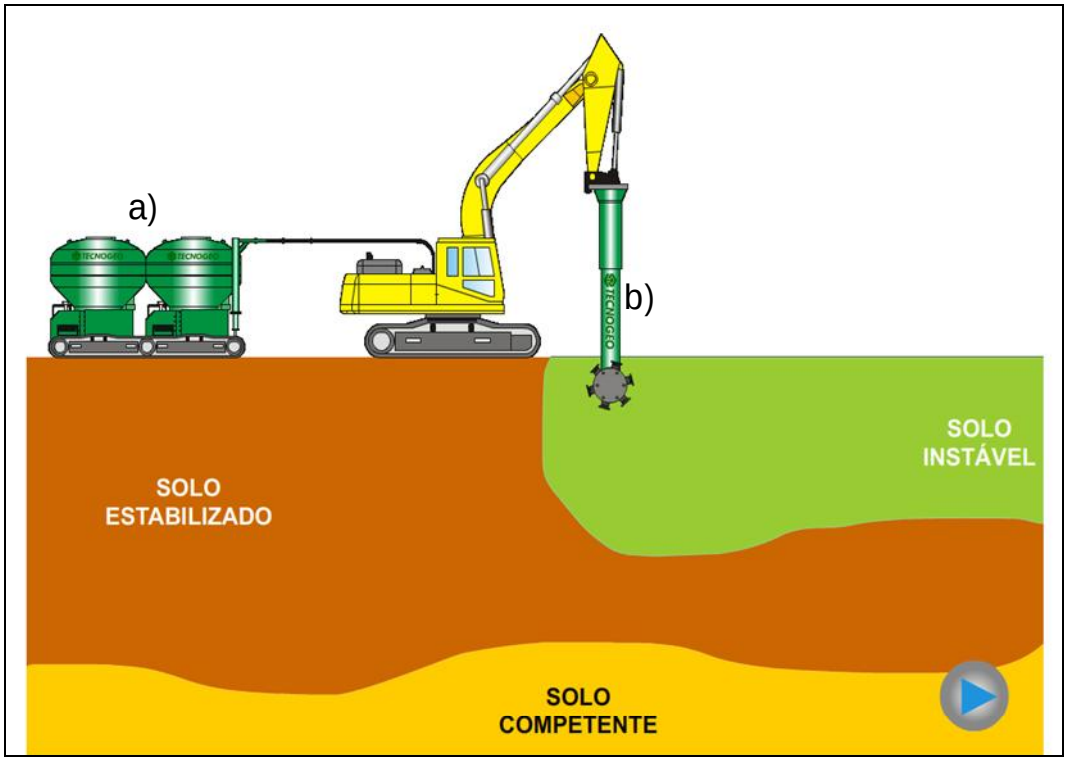


Figura 2.5 - Esquema geral de estabilização de solos moles com mistura com cimento seco, (Referência site da Stabtecno).
a) Tanques de armazenamento de cimento seco
b) Cabeça injetora, penetra na camada de solo mole varias vezes dosificando o cimento seco até obter uma mistura homogênea.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.2.5. Carregamento com vácuo

Esta técnica trabalha com a aplicação de uma pressão constante e ininterrupta de vácuo, a qual chega à camada de solo mole por meio de drenos verticais. Esta técnica será explicada com detalhes no item 1.3.

Vantagens

- Não utiliza material de aterro adicional, assim evitam-se todos os inconvenientes decorrentes da técnica de carregamento com aterro.

- Pode equivaler a usar cerca de 4m de sobrecarga com aterro (80kPa).

- Os equipamentos para a aplicação de vácuo são de pequeno porte comparados com os equipamentos tradicionais de movimento de terra, o que leva a ter um tráfego menor de veículos pesados.
- Carga com vácuo pode ser aplicada em somente uma etapa.
- Ao ser usado junto com carregamento com aterro se logra melhorar os tempos de adensamento.

Desvantagens

- Precisa-se de um fornecimento continuo e constante de energia elétrica.
- Precisa-se de técnicos durante todo o tempo em que os equipamentos de vácuo estejam em funcionamento.
- Caso se apresentem camadas granulares continuas na horizontal a eficiência cai.

2.3. Detalhes do usa da técnica de carregamento com vácuo

O adensamento com vácuo é uma técnica para melhoramento de solos moles que foi proposta por W. Kjellman (1952). Este método tem sido usado com sucesso em vários países para melhoramento de solos (Holtz, 1975; Chen e Bao 1983; Choa, 1990; Jacob et al., 1994; Bergado et al., 1998; Chu et al., 2000).

Nesta técnica são utilizados drenos de areia e recentemente drenos verticais pré-fabricados (PVDs prefabricated vertical drains) para distribuir a pressão de vácuo e dissipação de poro pressão (Chu, Yan, Indraratna, 2008). Uma carga nominal de vácuo de 80kPa é normalmente utilizada nestes projetos (Chu, Yan, Indraratna, 2008). Quando é necessário utilizar um sobre carregamento maior a 80kPa, pode ser utilizada uma combinação de sobre carregamento com vácuo e com aterro. O método de carregamento com vácuo é também utilizado em recuperação de terras que possuem lama de argila, a qual é muito mole como para usar carregamento com aterro. Milhares de hectares de solo foram recuperados em Tianjim, China, usando este método (Chen e Bao 1983; Chu e Yan, 2005).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.3.1.
Mecanismo de funcionamento do carregamento com vácuo

A tensão total (σ_T) em um solo saturado, antes de ser submetido a carregamento com vácuo ($t = 0^-$), é dada pela equação:

$$\sigma_T = \sigma' + u$$

Uma vez aplicado o carregamento com vácuo ($t = 0^+$), a tensão total não muda e a poro pressão se mantém no mesmo valor:

$$\sigma_T = \sigma' + u$$

Ao longo do tempo, à medida que a água do interior dos poros do solo vai drenando para fora da camada, a poro pressão vai diminuído e a tensão efetiva vai aumentando, mas a tensão total permanece inalterada.

No ($t = \infty$) a poro pressão chega ao menor valor e ao mesmo tempo a tensão efetiva atinge o maior valor (que é igual em magnitude ao valor de redução na poro pressão), e a tensão total do solo não muda,

$$\sigma_T = (\sigma' + \Delta\sigma') + (u - \Delta u)$$

Onde

$$\Delta\sigma' = \Delta u = \Delta\sigma_{vac}$$

$\Delta\sigma_{vac}$, incremento na tensão de vácuo aplicada.

Na Figura 2.6 apresenta graficamente a variação do excesso de poro pressão e de tensão efetiva ao longo do tempo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

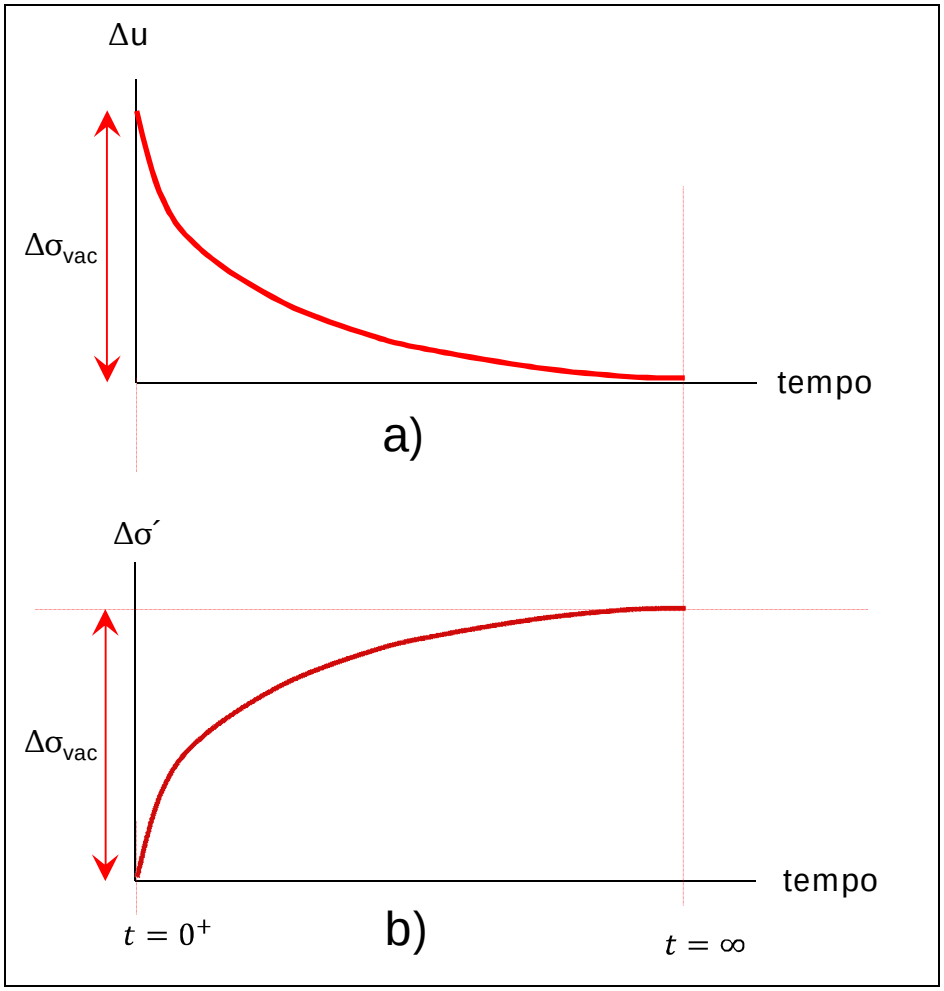


Figura 2.6 - Variação ao longo do tempo, em um processo de carregamento com vácuo.
a) do excesso de poro pressão
b) da tensão efetiva

2.3.2.
Técnicas de aplicação de vácuo no campo

Para a aplicação de vácuo é usado um tanque com uma interface ar-água como se apresenta na Figura 2.7.

Este sistema de válvulas funciona assim:

1. Com a válvula C fechada e as válvulas A e B abertas o vácuo é transmitido para os drenos verticais e consequentemente à camada de solo mole. A água que sai da camada de solo mole é depositada neste tanque.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

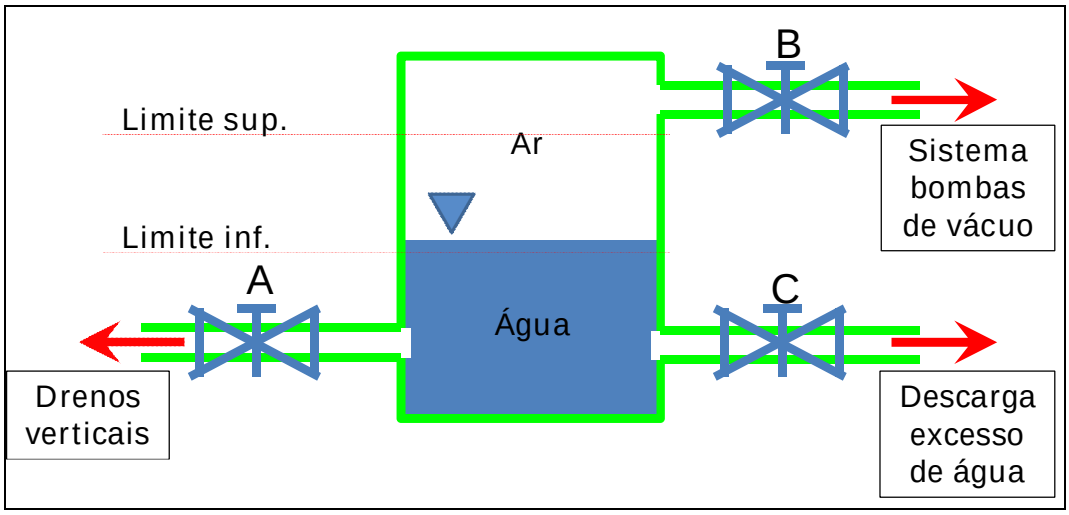


Figura 2.7 - Tanque com interface ar-água para ligação do sistema de bombas de vácuo e drenos verticais.

2. Quando a quantidade de água no interior do tanque chega ao limite superior automaticamente se fecham as válvulas A e B, e se abre a válvula C, para retirar o excesso de água até o nível inferior. Com o fechamento da válvula A procura-se fazer com que a pressão de vácuo nos drenos verticais seja mantida, a ocorrência de uma redução brusca desta pressão e equivalente a um descarregamento, que pode acontecer, por exemplo, se falta energia elétrica.

3. Quando a água atinge o nível inferior automaticamente se fecha a válvula C e se abrem as válvulas A e B, para permitir novamente a saída de água.

A ligação deste tanque aos drenos verticais pode ser feita de duas formas, as quais são explicadas a seguir:

2.3.2.1. Sistema com membrana

Todas as técnicas de melhoramento de solos precisam de uma primeira camada de aterro de conquista, fundamental para o tráfego dos equipamentos necessários para a implantação do sistema de melhoramento do solo.

Nesta técnica, como se pode observar na Figura 2.8 e na

Figura 2.9, trabalha-se com uma vala no perímetro da área a sofrer intervenção, esta vala é escavada até abaixo do lençol freático.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

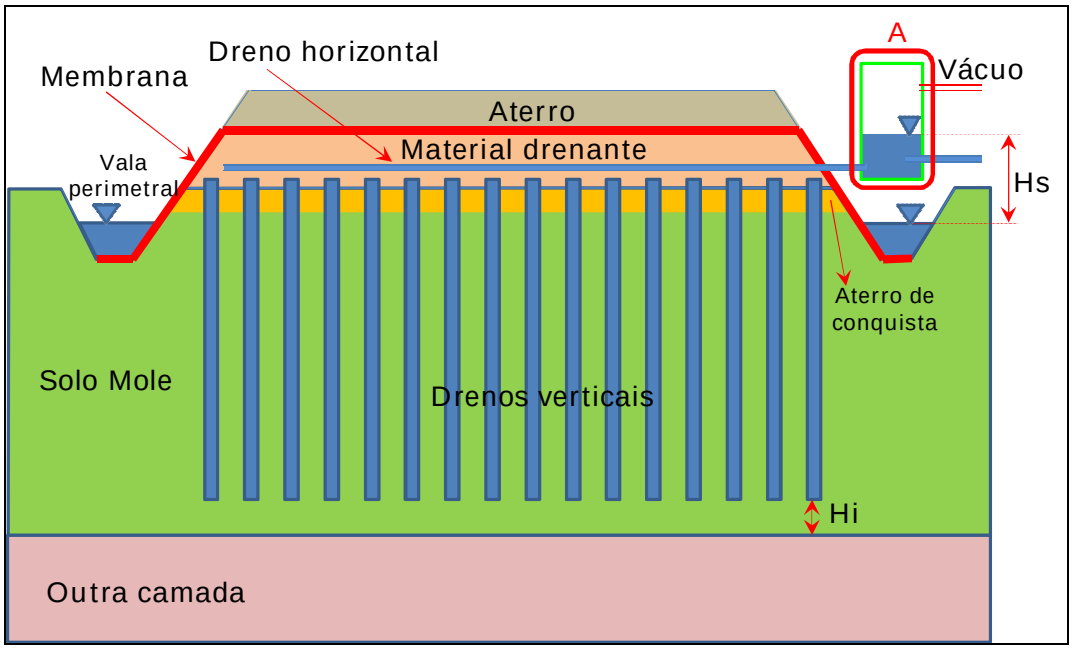


Figura 2.8 - Sistema de carregamento com vácuo com membrana. Detalhe A, ver Figura 8

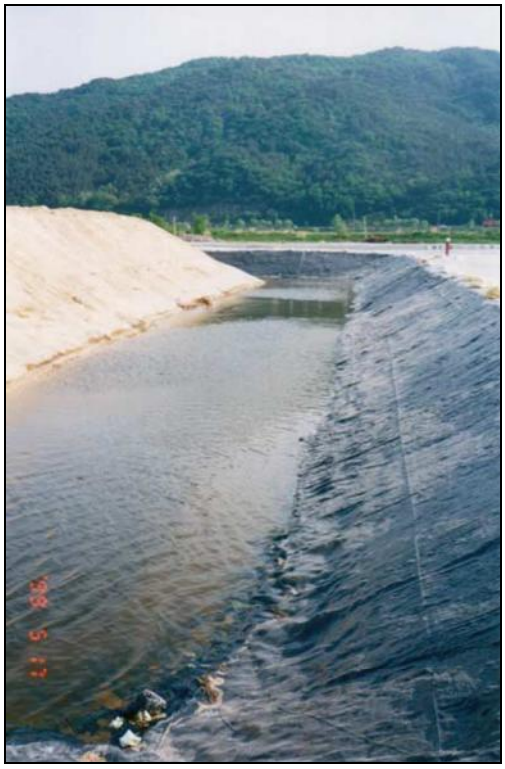


Figura 2.9 - Vala perimetral, (Referência Masse 2001).

No topo dos drenos é construída uma camada com material drenante (granular) na qual são instalados drenos horizontais que serão ligados ao tanque da interface (ver Figura 2.7). Normalmente são usados tubos horizontais flexíveis, corrugados de 50 ou 100mm de diâmetro (Chu, Yan, Indraratna, 2008). Estes tubos são perfurados e envoltos com um têxtil permeável que trabalha como uma camada filtrante (ver Figura 2.10). A membrana vai desde o fundo da vala

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

perimetral em um extremo até o fundo da vala no outro extremo, cobrindo totalmente a camada de material drenante.

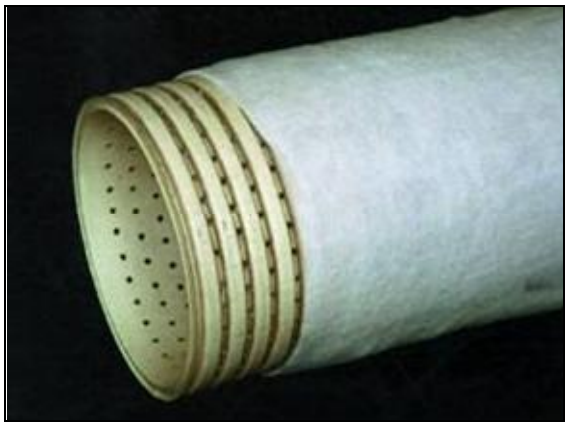


Figura 2.10 - Tubo corrugado flexível

Nesta técnica é fundamental para manter a pressão de vácuo durante todo o processo em que o vácuo estará ligado (tempo necessário para o solo atingir os recalques projetados), que a membrana ofereça um selo de vedação apropriada sem buracos, sendo críticas as junções entre trechos de membrana e as junções com os drenos horizontais.

Figura 2.11 - Sistema de bombas de vácuo. Do lado a vala perimetral. Pode se observar as mangueiras que se ligam aos drenos horizontais entrando através da membrana, (Referência Masse 2001).

Na Figura 2.11 é apresentada uma foto de um sistema de bombas de vácuo do lado de uma vala perimetral.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Quanto maior é a altura Hs menor é a pressão do vácuo que chega até a camada de solo mole, afetando a eficiência do sistema. A altura Hi é necessária para evitar que no sistema entre água da camada permeável inferior, o que levaria a uma perda de pressão.

Vantagens

- É o sistema mais típico usado para carregamento com vácuo e, portanto oferece um histórico importante de sucesso.

  Na Figura 2.12 se apresenta uma fotografia de uma área intervinda com esta técnica.

Figura 2.12 - Foto aérea, zona tratada com carregamento com vácuo, técnica com membrana, Menard 2012.

Desvantagens

- A vedação da membrana precisa de pessoal e ferramentas especializadas e cuidado durante a execução do aterro para não perfurar a membrana;

- A construção da vala perimetral pode ser limitada dependendo das características de cada projeto e apresentar dificuldades quando há NA profundo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.3.2.2.
Sistema dreno a dreno (sem membrana)

Neste sistema os drenos verticais são ligados a um sistema de tubulações que são ligadas no tanque da interface, como se apresenta na Figura 2.13.

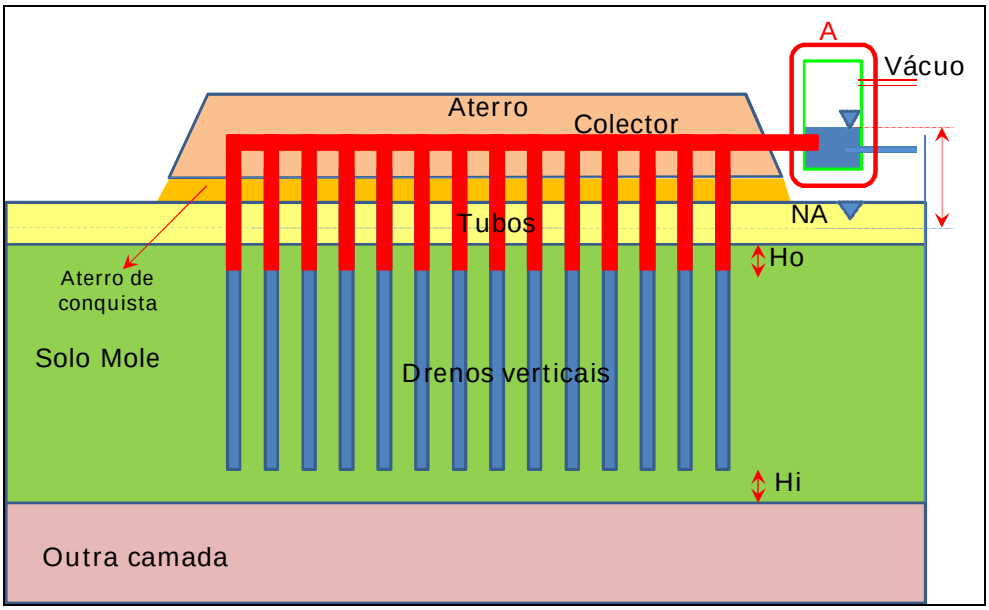


Figura 2.13 - Sistema de carregamento com vácuo dreno a dreno (sem membrana). Detalhe A, ver figura 8. Todos os tubos impermeáveis.

Os tubos devem ser impermeáveis até uma profundidade que garanta uma penetração Ho na camada de solo mole, isso é necessário para não ter perdas na pressão. O valor de Ho é um valor empírico que deve ser ao redor de 0.50m.

A ligação entre os tubos e os drenos verticais pode ser feita de diferentes formas dependendo do tipo de dreno vertical que seja usado, ver Figura 2.14.

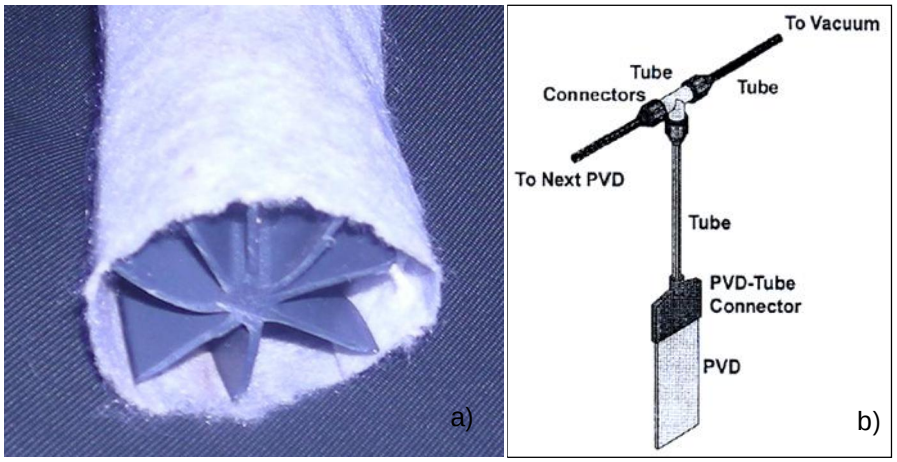


Figura 2.14 - a) Dreno stardrain, b) Junção entre PVD convencional e tubulação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Na Figura 2.15 se apresenta uma foto das ligações entre as tubulações e no fundo da foto um equipamento para instalação de drenos verticais.

Figura 2.15 - Vista das conexões entre tubos ligados a drenos verticais. Referência Sandroni 2012.

Vantagens

- Não precisa de vala perimetral, o que pode ser muito conveniente caso tenha limitação de espaço;
- A vedação das tubulações precisa somente de ferramentas convencionais, para conexão de tubulações de PVC.

Desvantagens

- A junção entre o dreno e as tubulações pode complicar o processo de cravação dos drenos, dependendo do tipo de dreno utilizado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2.4.
Descrição de pesquisas sobre adensamento com vácuo

Têm sido desenvolvidas diferentes pesquisas no mundo para o estudo da técnica de melhoramento de solos moles com carregamento com vácuo, tanto em trabalhos de campo como em trabalhos de laboratório. A seguir se explica um pouco sobre alguns destes trabalhos:

2.4.1.
Trabalhos de Campo

Tang e Shang, 2000, fizeram um estudo de aplicação desta técnica em uma via do aeroporto de Yaoqiang utilizando a técnica com membrana e usando paredes de vedação (no lugar de valas perimetrais), construídas com lama de argila de baixa permeabilidade até a profundidade do fundo da camada de solo mole a ser tratada. Fizeram uma comparação entre duas áreas, uma tratada com carregamento com aterro e outra com a técnica de carregamento com vácuo, as duas áreas instrumentadas, o resultado da comparação foi que se obtiveram recalques, resistências não drenadas (medidas com ensaios de palheta), resistências de ponta CPT, com a técnica de carregamento com vácuo, bastante similares aos obtidos na técnica de carregamento com aterro. Como resultado deste teste a técnica com vácuo foi escolhida para o melhoramento de toda a via.

Foram tratadas, com vácuo, 11 áreas individuais que somam um total de 145,000m^2, obtendo-se recalques, depois de 85 dias de tratamento, entre 11% e 37% maiores aos esperados.

Chu, Yan e Yang, 2000, apresentam o estudo de um caso de aplicação do método de carregamento com vácuo para melhoramento de solo em Tianjin, China, em uma área destinada à construção de uma estação de armazenamento de petróleo. Foi tratada uma área 50,000m^2 com uma camada de solo mole ao redor de 20m de espessura que contém de 4 a 5m de lama de argila dragada. Foi usada a técnica com membrana com vala perimetral. Os drenos verticais foram espaçados 1m e foram usados coletores horizontais de 10mm corrugados flexíveis. O conteúdo de água desta camada era bem maior ou igual ao limite liquido. Foi aplicado um carregamento com vácuo de 80kPa durante 4 meses foi obtido um recalque ao redor de 1m e o grau de adensamento foi mais de 80%. A resistência

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

não drenada do solo, medida com ensaios de palheta, se aumentou de duas ou três vezes. Foi medido um deslocamento horizontal máximo de 48.3cm. Foi observada a formação de trincas na superfície do terreno. Não foi usado carregamento com aterro.

Masse, Spaulding e Varaksin, 2001, apresentaram um trabalho titulado Adensamento com Vácuo – Uma revisão a 12 anos de desenvolvimento com sucesso. Neste trabalho são apresentadas experiências de 20 casos históricos em projetos em diferentes países da Europa e em países orientais como Korea do Sul, Malásia e Tailândia. Nestes projetos foi usada a metodologia com membrana e com valas perimetrais, desenvolvida pela empresa Menard.

Chu e Yan, 2005, apresentaram um trabalho onde estudam um caso de aplicação do carregamento com vácuo para melhoramento de solos moles e outro caso de aplicação de carregamento com vácuo junto com carregamento com aterro. Ambos os casos de obras feitas em Tianjin, China. No segundo caso os autores concluem que o uso de carregamento com aterro ajuda a reduzir o deslocamento horizontal quando é usada à técnica de carregamento com vácuo. Nos dois casos o vácuo foi aplicado a profundidades maiores que 10m (20 e 16m) obtendo-se resultados satisfatórios.

Chai, Carter e Hayashi, 2006, apresentaram um estudo onde analisam as vantagens de usar carregamento com vácuo junto com carregamento com aterro para reduzir deslocamentos horizontais, para usar um carregamento maior (tensão pelo peso do aterro mais a pressão do vácuo) e para reduzir tempos. É descrito um caso de melhoramento de solos moles com carregamento com vácuo e com aterro para a construção de uma estrada em Saga, Japão. Apresentam resultados obtidos com instrumentação e analisados usando um método de elementos finitos de duas dimensões. É proposta também uma equação para calcular a penetração ótima do PVD (estimar o valor de Hi) na camada de solo mole para os casos que a camada seguinte, abaixo da camada de solo mole, é um material de alta permeabilidade, com o objetivo de não perder pressão.

Existem vários outros trabalhos feitos por diferentes autores para o estudo da aplicação desta técnica em obras em diferentes países, como são os trabalhos de Varaksin e Abt 2007, Miyakoshi et al., 2007a e b; Indraratna, et al. 2011;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

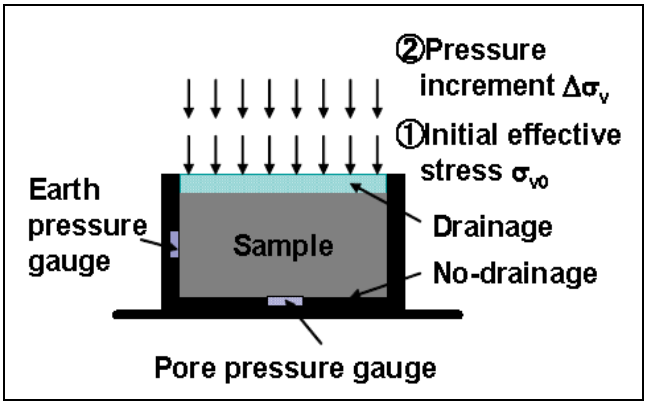
Hayashi et al. 2003; Saowapakpiboon et al., 2008 (caso de aplicação técnica sem membrana); entre outros. No Brasil foi feito um trabalho usando a técnica de dreno a dreno, esta experiência encontra-se detalhada no trabalho de Sandroni, Andrade e Odebrecht, 2012.

Em campo também tem sido desenvolvidos testes para o estudo de características específicas desta técnica, como são os trabalhos de Qiu et al., 2007 que estudou a distribuição do vácuo e a variação das poro pressões em aterros experimentais tratados com carregamento com vácuo e o trabalho de Marques, Leroueil e Almeida, 2003, que estudaram o uso de carregamento com vácuo combinado com aquecimento em aterros experimentais.

2.4.2.
Trabalhos de Laboratório

A técnica de melhoramento de solos moles com carregamento com vácuo também tem sido objeto de pesquisa em trabalhos desenvolvidos em laboratórios de geotecnia.

O trabalho de Chai, Sakai, Hayashi e Hino, 2007, é um completo estudo de aplicação de vácuo em ensaios de adensamento com oedômetro. Ver Figura 2.16.



Tradução	
Inglês	Português
Sample	Corpo de Prova
Earth pressure gauge	Medidor de pressão horizontal
Pore pressure gauge	Medidor de poro pressão
Pressure Increment	Incremento de tensão
Initial effective stress	Tensão efetiva inicial

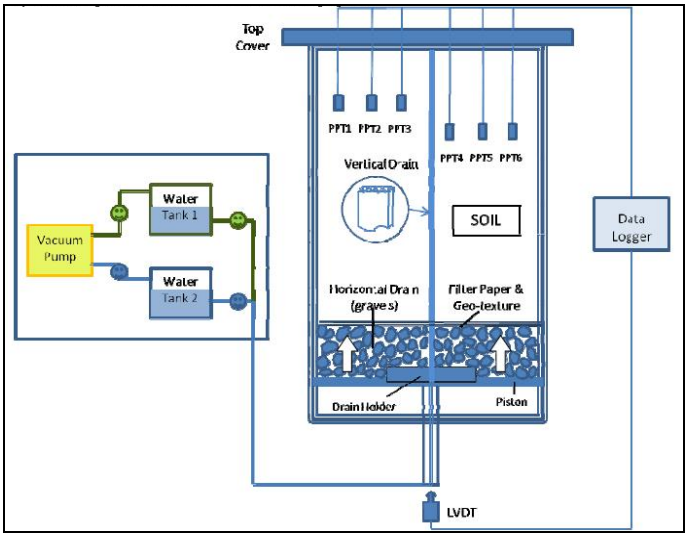
Figura 2.16 - Esquema geral do ensaio .$\Delta\sigma_v$ em alguns ensaios foi feito com vácuo e em outros com carregamento convencional. Chai et al., 2007.

Neste trabalho foram usados corpos de prova de 6cm de diâmetro e 2cm de altura. Foi usada a argila Ariake (31% de argila, 67.8% de silte, 1.2% de areia, e =

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

3.63) e uma mistura de 50% de argila Ariake e 50% de areia. Foi feita uma campanha de ensaios de uma camada de argila Ariake usando diferentes cargas verticais (σ'_{vo} de 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120) em cada ensaio antes de aplicar uma tensão de 80kPa que em uma campanha foi feita com pressão de vácuo e em outra com carregamento convencional. Também fizeram ensaios para duas camadas usando em um ensaio na parte superior a argila Ariake e na parte inferior a mistura de solo e outro ensaio o mesmo, mas com a posição das camadas invertida. Os resultados destes ensaios indicaram que a pressão de vácuo induz um recalque menor ou igual que o obtido com um carregamento convencional da mesma magnitude. Se a tensão vertical efetiva inicial é pequena e a pressão de vácuo é maior que a pressão lateral requerida para manter a condição ko (sem deslocamento lateral) vai se obtiver um deslocamento horizontal para o interior e a pressão de vácuo vai induzir um recalque menor que a um carregamento convencional da mesma magnitude.

Li, Wu, Chu, e Lam, 2011 apresentam um estudo que compara as duas técnicas de utilização de carregamento com vácuo Menard (com membrana) e a Beudrain (dreno a dreno, sem membrana). Ver Figura 2.17.



Tradução	
Inglês	Português
Vertical Drain	Dreno Vertical
Horizontal Drain (graves)	Dreno horizontal
Filter Paper & Geo-texture	Papel filtro e Geotêxtil
Soil	Solo
Piston	Pistom
Water	Água
Tank	Tanque
Vacuum Pump	Bomba de vácuo

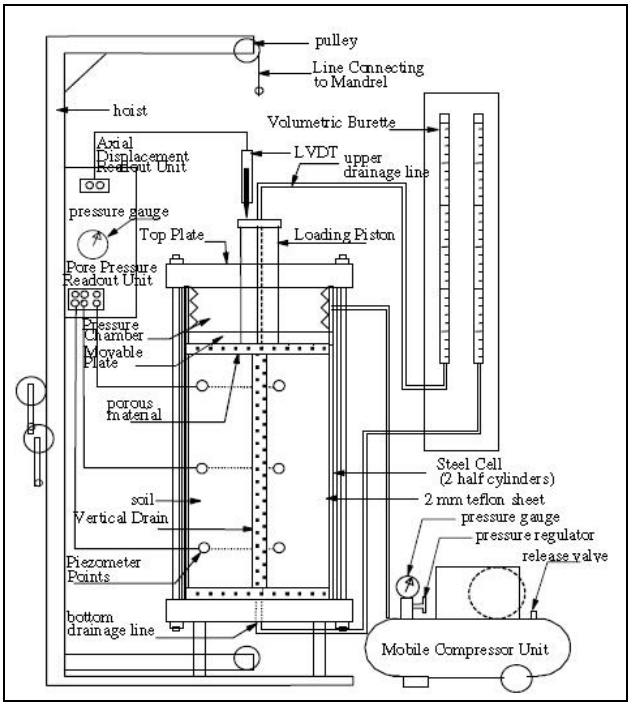
Figura 2.17 - Modelo usado por Li, 2011. Para simular o modelo dreno a dreno o vácuo foi ligado diretamente no dreno, no caso do modelo Menard o vácuo foi ligado no dreno horizontal na base do corpo de prova.

Também compararam o uso de dreno circular e o dreno de banda. Foram usados modelos de laboratório de 30cm de diâmetro e 100cm de altura, o vácuo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

foi aplicado usando um dreno vertical cravado no centro dos modelos. O resultado destes ensaios foi que o sistema Menard é mais efetivo baixo às condições do ensaio, isso é parcialmente devido à aplicação adicional de pressão de vácuo através do dreno horizontal, de qualquer maneira isso pode ser insignificante quando a espessura do solo é grande. Outro resultado obtido neste trabalho é que não há muita diferença entre o uso do dreno circular e o dreno de banda.

Rujikaitkamjorn, Indraratna e Sakr, 2008 fizeram um estudo usando modelos de 45cm de diâmetro e 95cm de altura. Ver Figura 2.18.



Tradução	
Inglês	**Português**
Pulley	Polia
Line Connecting to Mandrel	Linha para ligar o mandril
Volumetric Burette	Bureta volumétrica
Upper drainage line	Linha de drenagem superior
Loading Piston	Pistom de Carga
Hoist	Vertical para levantar peças
Axial Displacement Redout Unit	Unidade de leitura de deslocamento axial
Pressure gauge	Medidor de Pressão
Top Plate	Prato do Topo
Pore Pressure Redout Unit	Unidade de leitura de poro pressão
Pressure Chamber	Câmara de pressão
Movable Plate	Prato movimentável
Porous material	Material Poroso
Soil	Solo
Vertical Drain	Dreno vertical
Piezometer Points	Pontos Piezométricos
Bottom drainage line	Linha de drenagem inferior
Steel Cell (2 half cylinders)	Célula da Aço (dois meios cilindros)
2mm Teflon sheet	Folha de 2mm de teflon
Pressure gauge	Medidor de Pressão
Pressure regulator	Regulador de Pressão
Release valve	Válvula de alivio
Mobile Compressor Unit	Compressor

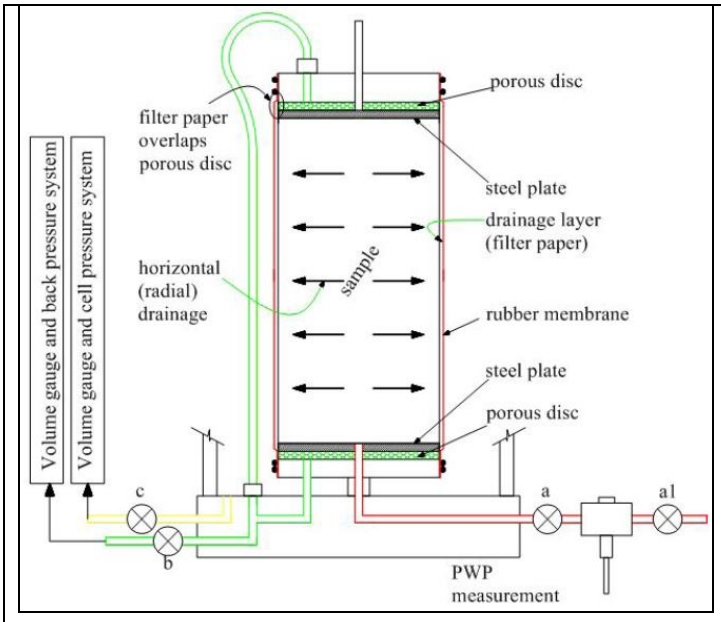
Figura 2.18 - Consolidômetro de grande escala usado por Rujikaitkamjorn et al., 2008.

O vácuo foi aplicado usando um dreno vertical no centro do modelo e foi estudada a distribuição da poro pressão nos modelos usando vários transdutores de poro pressão localizados a diferentes alturas e a diferentes distâncias do centro do modelo. Também foi estudada a variação da deformação vertical ao longo do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

tempo. Os resultados destes ensaios indicam que um sistema de drenos pré-fabricados (PVD) junto ao carregamento com vácuo é um método efetivo de acelerar o adensamento. Sempre que uma carga adicional for aplicada é esperado um aumento no recalque e na poro pressão.

Duong, Teparaksa e Tanaka 2012, estudaram o carregamento com vácuo, usando uma célula triaxial para corpos de prova de 7.50cm de diâmetro e 15.00cm de altura, usando drenagem radial com o uso de uma lâmina metálica no contato entre o corpo de prova e a pedra porosa e o uso de papel filtro na superfície lateral do corpo de prova (ver Figura 2.19). Este ensaio, com corpos de prova pequenos, pode ser feito em uma semana, comparado com os ensaios com corpos de prova de grande escala que precisam de um mês para ser feitos. Neste trabalho foram feitas modelagens com elementos finitos os quais estiveram concordantes com os resultados obtidos nos ensaios.



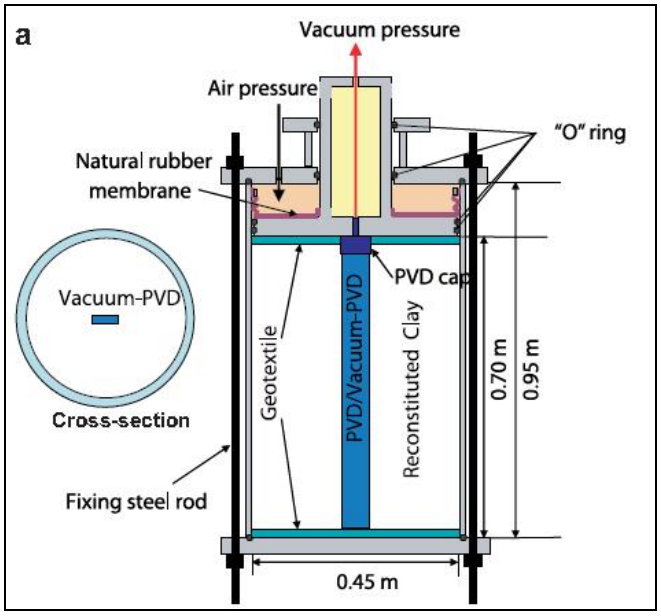
Tradução	
Inglês	**Português**
Volume gauge and back pressure system	Medidor de volume e sistema de contra pressão
Volume gauge and cell pressure system	Medidor de volume e sistema de pressão da célula
Filter paper overlaps porous disc	Papel filtro sobre passa pedra porosa
Horizontal (radial) drainage	Drenagem horizontal (radial)
Sample	Corpo de Prova
Porous disc	Pedra porosa
Steel plate	Disco de aço
Drainage layer (filter paper)	Papel filtro
Rubber membrane	Membrana
PWP measurement	Medidor de poro pressão

Figura 2.19 - Esquema do ensaio triaxial estudado por Duong et al., 2012.

Saowapakpiboon, Bergado, Voottipruex, Lam e Nakakuma, 2011, fizeram estudos usando modelos de 45cm de diâmetro e 70cm de altura (ver Figura 2.20), aplicando o vácuo através de um dreno vertical cravado no centro do modelo com o objetivo de estudar a técnica de melhoramento de solos moles de carregamento com vácuo e a técnica de carregamento com aterro. Os resultados dos ensaios foram comparados com modelagens feitas com FEM (Finite element method, método de elementos finitos). Foram feitos ensaios com carregamento

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

convencional de 100kPa e comparados com ensaios feitos com 50kPa de carregamento convencional e 50kPa de pressão de vácuo. O resultado destes ensaios foi que no ensaio com vácuo teve uma taxa de adensamento mais rápida, mas os recalques finais obtidos em cada um dos ensaios foram iguais. Foi desenvolvido um software com uso de elementos finitos, muito útil para o calculo de recalques de melhoramento de solos com uso de PVD com e sem uso de carregamento com vácuo.



Tradução	
Inglês	**Português**
Vacuum pressure	Pressão de vácuo
Air pressure	Pressão de ar
Natural rubber membrane	Membrana
Vacuum - PVD	PVD para vácuo
Cross-section	Seção transversal
Fixing steel rod	Barra fixa de aço
Geotextile	Geotêxtil
PVD cap	Cap do PVD
"O" ring	O-rings

Figura 2.20 - Esquema do equipamento usado (consolidômetro de grande escala) por Saowapakpiboon et al. 2011.

Entre outros estudos em laboratórios de geotecnia encontram-se os trabalhos de Mohamedelhassan, Shang, 2002; Leong, Soemitro e Rahardjo, 2000; Chai, et al., 2009, Manfouz et al., 2005.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA