3
Desenvolvimento dos Ensaios

Os ensaios de laboratório escolhidos nesta dissertação para a utilização de vácuo e para estudar o comportamento de um solo mole, submetido a este tipo de pressão, são:

- Ensaio de Adensamento convencional (de carregamento incremental) com oedômetro na prensa tipo Bishop. Este ensaio permite conhecer a compressibilidade do solo, ao longo do tempo. É um dos ensaios de laboratório mais apropriados e um dos mais comumente usados para o estudo de um projeto de aterro sobre argilas moles.

- Ensaio de Adensamento, isotrópico, na célula triaxial, com drenagem por um extremo do corpo de prova e medição de poro pressão no outro extremo. Este ensaio permite estudar a variação de poro pressões ao longo do tempo, durante um processo de adensamento.

Estes ensaios têm uma importante vantagem: são uns dos ensaios mais comumente usados em laboratórios de Geotecnia. Implementar o uso de vácuo, nestes ensaios seria menos difícil do que desenvolver ensaios novos com equipamentos novos ou pouco comuns, o que poderia ajudar a um maior uso da técnica de melhoramento de solos moles por adensamento com vácuo.

Neste capítulo é apresentada uma descrição do procedimento usado para o desenvolvimento dos ensaios, mostrando, não somente o procedimento que deu bons resultados, senão também as dificuldades encontradas no normal processo de ensaio e erro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

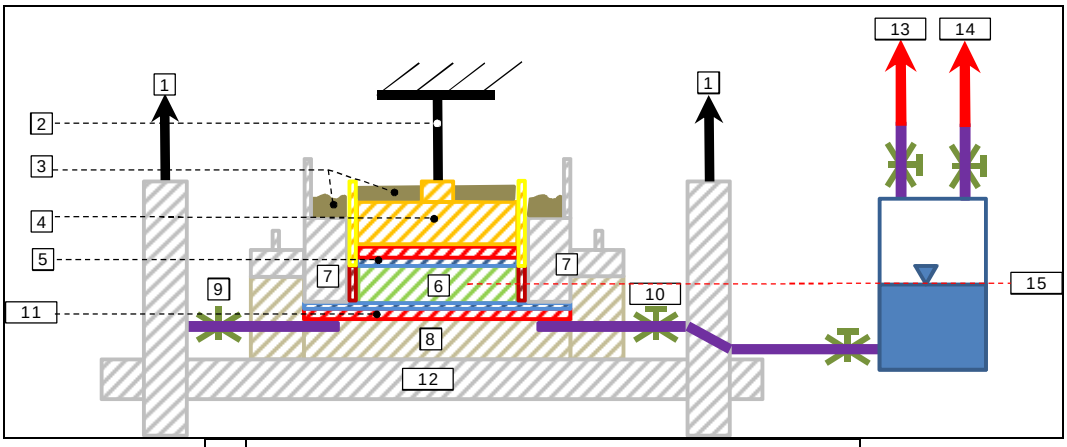
3.1.
Utilização de vácuo em um ensaio de adensamento convencional.

3.1.1.
Objetivo do ensaio

O objetivo deste ensaio é conhecer como é o comportamento ao longo do tempo de um corpo de prova de solo mole, no oedômetro na prensa tipo Bishop, em um ensaio de carregamento incremental, quando submetido à aplicação de uma pressão de vácuo. Espera-se obter, de acordo com as pesquisas já existentes sobre o tema, a compressibilidade e comparar com a obtida num estágio convencional de carregamento com pesos.

3.1.2.
Equipamento desenvolvido e breve descrição do ensaio

Primeiramente são realizados estágios convencionais de carregamento com pesos até atingir uma tensão σ'_v de 160kPa, depois é feito um estágio com vácuo com uma pressão de 80kPa. Na Figura 3.1 é apresentado um esquema detalhado do oedômetro e as ligações feitas para a aplicação do vácuo.



1	Suporte ligado com braço da Prensa com σ'_v aplicada
2	Suporte fixo da Prensa
3	Graxa de vaselina
4	Cap
5	Papel filtro
6	Corpo de prova (C.P.)
7	Parte superior do oedomêtro
8	Parte inferior do oedômetro sem canais e em forma de funil
9	Valvula fechada
10	Valvula aberta, ligação pressão de vácuo
11	Pedra porosa
12	Suporte Prensa
13	Ligação manomêtro para controle da pressão
14	Ligação a sistema de vácuo
15	Interfase ar-água nivelada com o centro da altura do C.P.

Figura 3.1 – Esquema do oedômetro utilizado e ligações para o estágio com vácuo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

3.1.3.
Dificuldades encontradas durante o desenvolvimento

Durante o desenvolvimento deste ensaio, apresentaram-se uma série de dificuldades que obrigaram à implementação de técnicas que permitiram a apropriada realização do ensaio. Em seguida são descritos os problemas e as soluções adotadas.

3.1.3.1.
Transmissão da pressão do vácuo até o corpo de prova

Inicialmente, foi usado um oedômetro convencional (ver Figura 3.2). Ao ser ligado o vácuo, no ensaio montado com este equipamento, obteve-se nenhum resultado: não saiu água do corpo de prova e não se registraram recalques.

Foi concluído, após esta experiência, que a base de um oedômetro convencional não permite que o vácuo seja transmitido apropriadamente até o corpo de prova pela geometria do sistema de canais que tem na parte inferior (onde se apoia a pedra porosa, ver Figura 3.3).

Figura 3.2 - Montagem do ensaio de adensamento em um oedômetro convencional

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

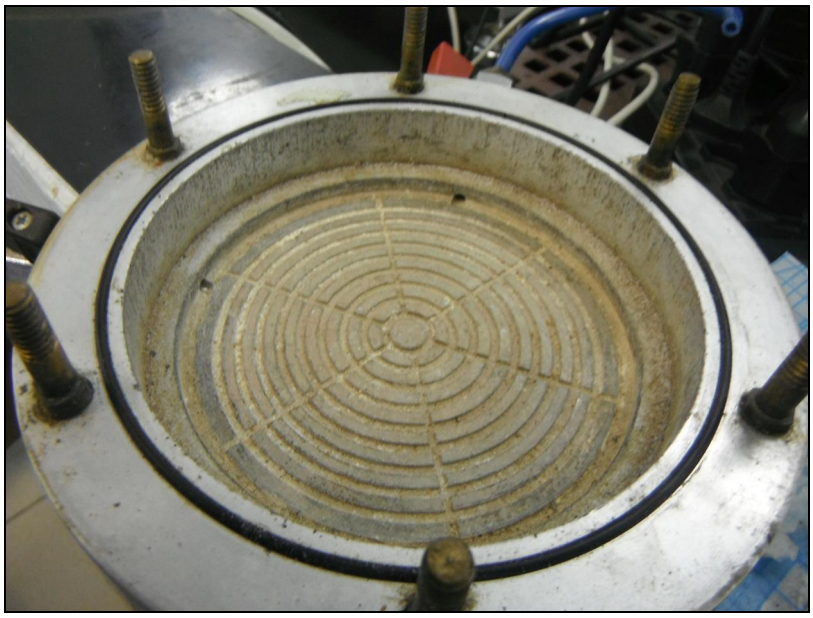


Figura 3.3 - Interior da base de oedômetro convencional

Foi fabricada uma base para o oedômetro, com a superfície de apoio da pedra porosa em forma de funil (ver Figura 3.4).

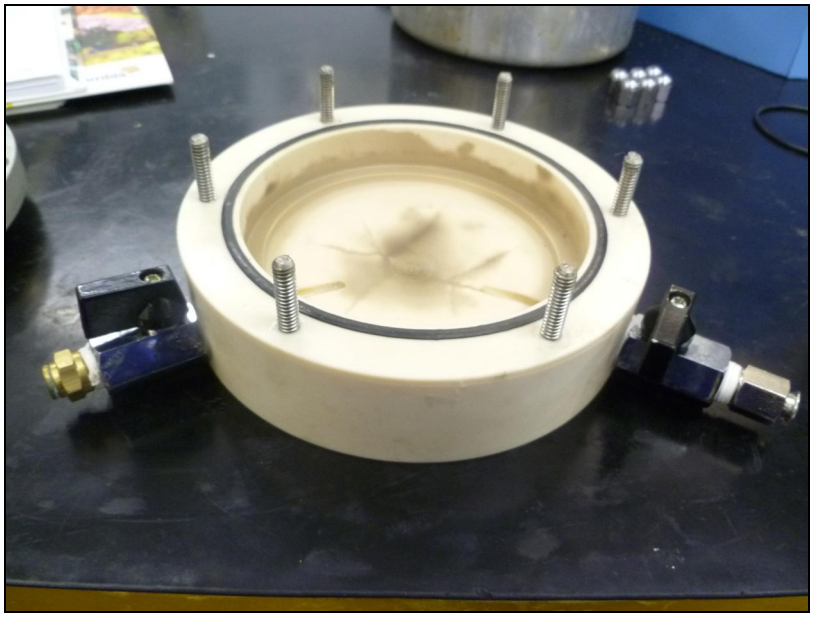


Figura 3.4 - Base de oedômetro fabricada com fundo em forma de funil.

Com esta base para o eodômetro, foi feito um ensaio, somente com um estágio de 3.75kPa de tensão convencional com pesos e um segundo estágio com vácuo de 80kPa. Durante a aplicação do vácuo se observou água saindo do corpo de prova e se registraram recalques. Foi então assumido que este instrumento era

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

apropriado para a realização dos ensaios com vácuo, resolvendo-se o problema de transmissão de pressão de vácuo até o corpo de prova.

Neste primeiro ensaio com pouca carga vertical por pesos $(\Delta\sigma_{vac} \gg k_o \cdot (\sigma'_0 + \Delta\sigma_{vac}))$, foi observado o descrito no artigo "Characteristics of vacum consolidation comparing with surcharge load induced consolidation" realizado por Jin-Chun Chai e Akira Sakai (ver bibliografia), onde se fala que quando $\Delta\sigma_{vac} \gg k_o \cdot (\sigma'_0 + \Delta\sigma_{vac})$, o corpo de prova se separa do anel de confinamento, ver Figura 3.5. Neste ensaio, além disso, observou-se a formação de trincas no corpo de prova pela grande diferença entre $(\Delta\sigma_{vac})$ e $(k_0 \cdot (\sigma'_0 + \Delta\sigma_{vac}))$.

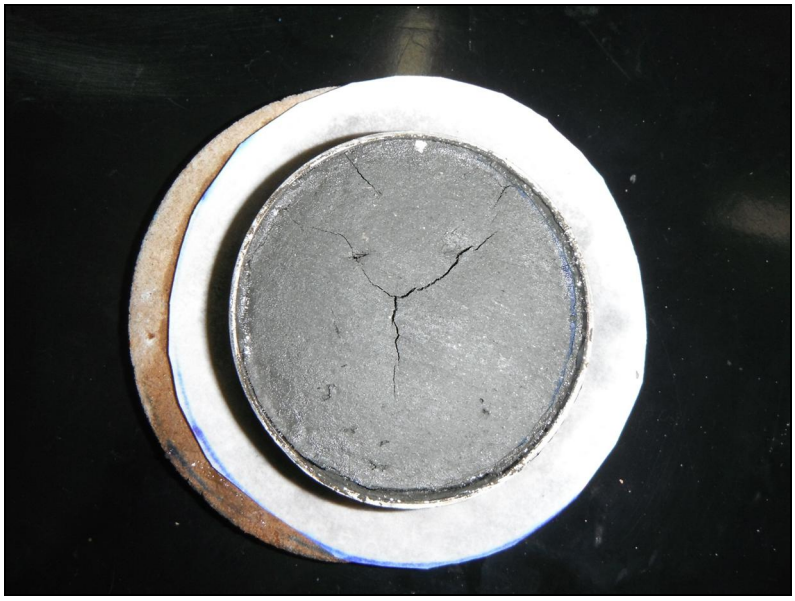


Figura 3.5 - Foto de amostra trincada e afastada do anel de confinamento, depois de ser submetida a uma pressão de vácuo bem maior que a tensão por carga vertical.

3.1.3.2. Vedação no oedômetro para manter a pressão do vácuo

Quando se iniciou a realização destes ensaios, foi observada na interface ar-água (Ver primeiro parágrafo do item 3.3.) a presença de um borbulhamento, o que evidenciava entradas de ar, em alguma das conexões. Foi identificado como a principal zona de entrada de ar, os contatos entre o anel de ajuste (ver Figura 3.11) e a parte superior do oedômetro (contato A) e entre o anel de ajuste e o cap

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

(contato B), ver Figura 3.6. Para vedar estas conexões foram testadas algumas técnicas (cada qual, independente da outra) as quais se numeram a seguir:

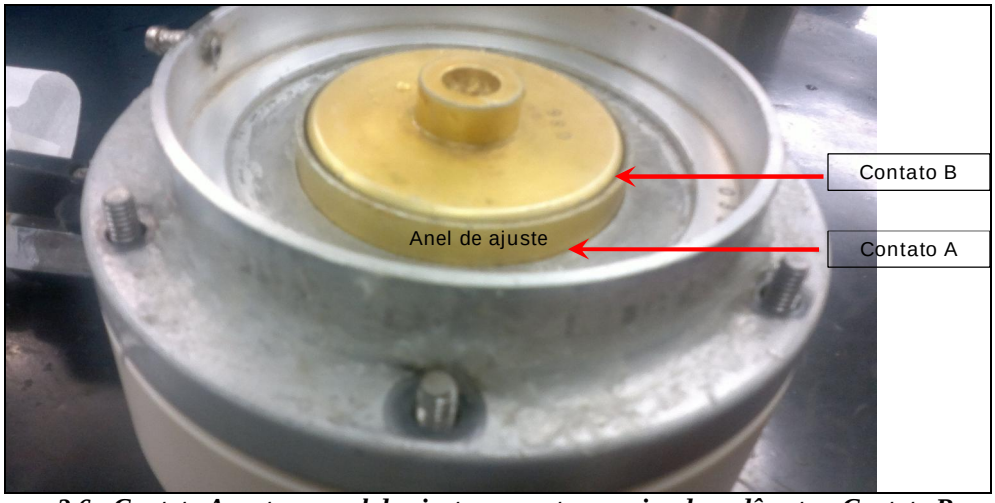


Figura 3.6 - Contato A, entre o anel de ajuste e a parte superior do oedômetro. Contato B, entre o anel de ajuste e o cap.

1. No contato A, aplicou-se silicone e no contato B aplicou-se graxa de vaselina, em quantidades suficientes somente para tapar o espaço entre as peças. Esta vedação não funcionou, (por ser usada pouca quantidade destes materiais), depois de um tempo começou-se a apresentar pequenos buracos na graxa de vaselina. Além disso, o silicone demora mais de duas horas para se secar.

2. No contato A aplicou-se silicone e no contato B foi colocada uma borracha de pouca espessura com o objetivo de quando o vácuo for aplicado à borracha fosse puxada até que o contato ficasse bem vedado. Esta vedação não funcionou porque a borracha, com o tempo, se deformava, provavelmente porque reagia com o silicone, formando canais por onde se permitia a entrada de ar. Ver Figura 3.7 e Figura 3.8

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

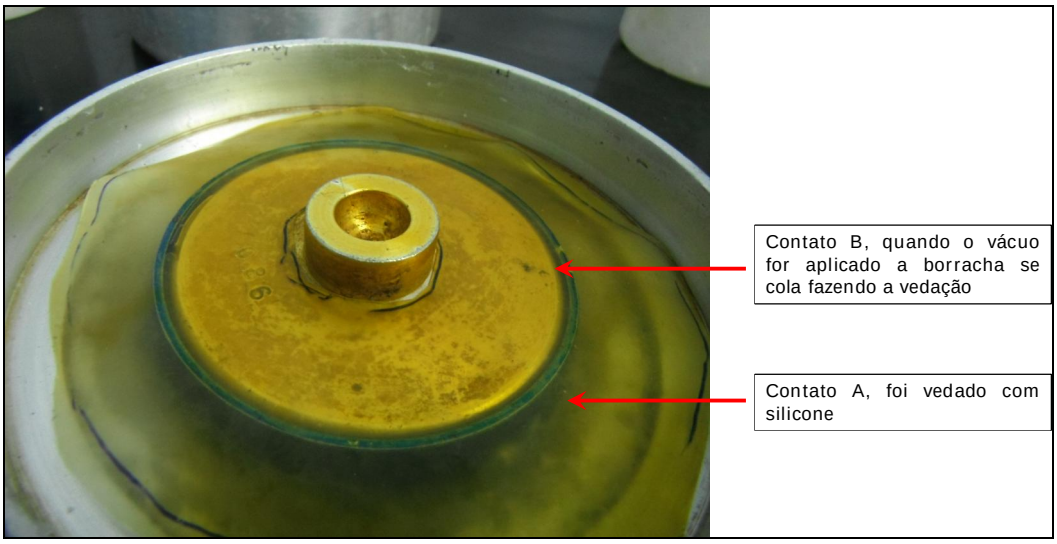


Figura 3.7 - Vedação no contato B, com borracha de pequena espessura; no contato B com silicone.

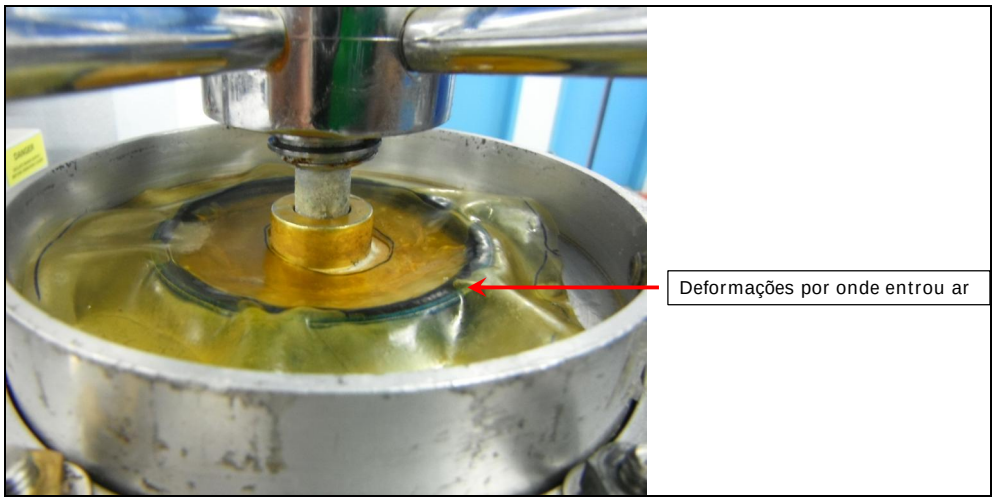


Figura 3.8 - Deformações que se apresentaram na borracha de vedação, depois de certo tempo, por onde entrou ar.

3. No contato A foi colocada grande quantidade de graxa de vaselina para cobrir todo o espaço, e no contato B foi colocando água durante os estágios convencionais de carregamento com pesos, justo antes de iniciar o estágio de aplicação do vácuo, a água foi retirada com cuidado, a superfície do cap. foi seca e depois foi coberto com graxa de vaselina todo o volume entre o cap. e a parte mais superior do anel de vedação. Ver Figura 3.9 e Figura 3.10. Esta vedação funcionou muito bem e parou totalmente com o borbulhamento, durante todo o estágio de aplicação do vácuo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

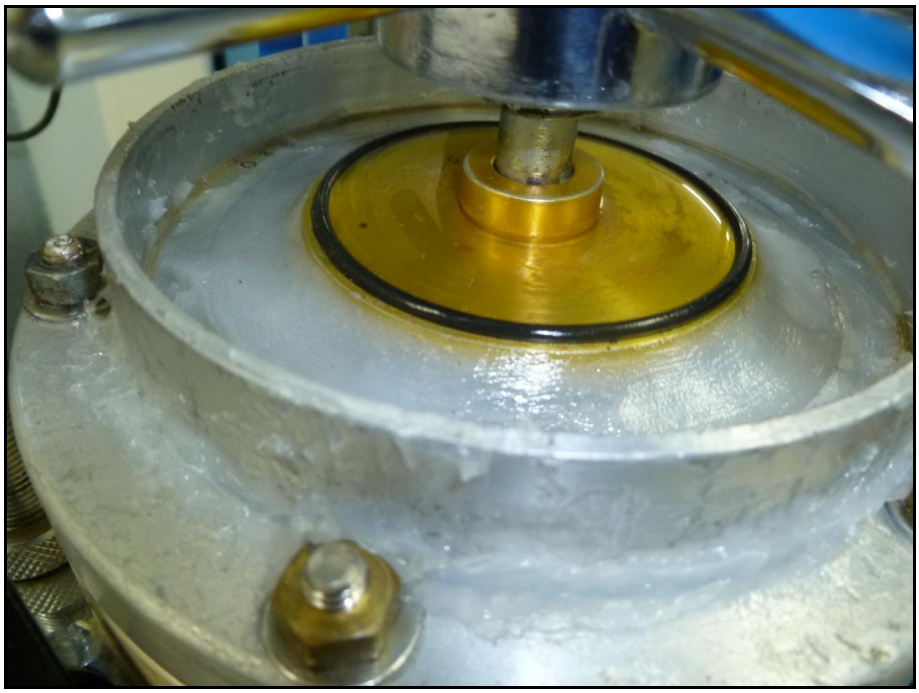


Figura 3.9 - Vedação durante os estágios convencionais de carregamento com pesos. No contato A, graxa de vaselina em grande quantidade, No contato B, água.

Figura 3.10 - Vedação durante o estágio de aplicação do vácuo. Nos contatos A e B se botou graxa de vaselina em grande quantidade.

3.1.3.3. Tempo do ensaio e aquisição de dados

O tempo usado com mais frequência, para um estágio de carregamento convencional com pesos, na prensa tipo Bishop, é de 24 horas, tempo para estudo de adensamento primário e parte do adensamento secundário. Geralmente depois

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

deste tempo obtém-se uma curva na que se pode observar, claramente, em seu tramo final, uma inclinação razoavelmente constante. No estágio com vácuo se procurou obter uma curva na qual se possa observar claramente o trecho final. Para obter isso é necessário um tempo de, pelo menos, 38 horas, de aplicação de vácuo constante e ininterrupto.

Foram usados os mesmos tempos para tomadas de leituras de um estágio de carregamento convencional com pesos, a exceção daqueles tempos que têm intervalos maiores que duas horas, nestes casos tomaram-se leituras cada máximo duas horas, com o objetivo de ter mais pontos o que permite conhecer mais detalhadamente a forma da curva.

3.1.4. Descrição do procedimento do ensaio

Em seguida se descreve, passo a passo, o procedimento obtido para a realização do ensaio: A Figura 3.11 mostra as figuras que compõem o oedômetro usado para ensaios com vácuo.

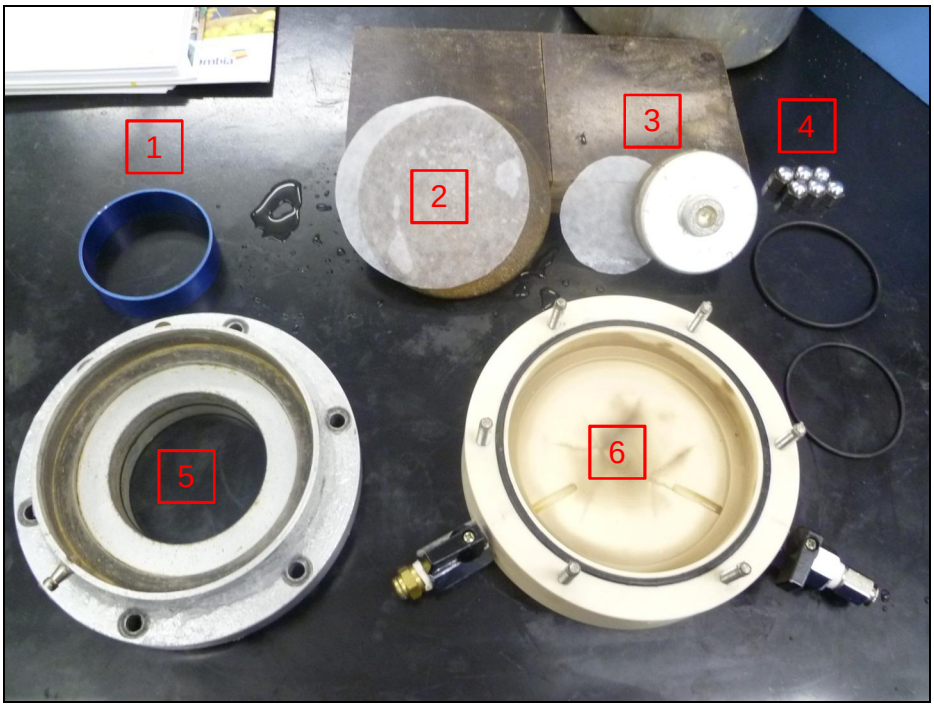


Figura 3.11 - Peças do oedômetro para fazer o ensaio de adensamento com um estágio de vácuo,

1. Anel de ajuste,
2. Pedra porosa e papel filtro inferior,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

3. Cap e papel filtro superior,
4. Porcas,
5. Parte superior do oedômetro,
6. Parte inferior do oedômetro

I. Antes de moldar o corpo de prova:

1. Cortar os papéis filtro com as dimensões das pedras porosas.
2. Saturar as pedras porosas submergindo-as em uma chaleira com água e esquentando até que a água ferva.
3. Medir a altura e o diâmetro do anel de confinamento onde é colocado o corpo de prova.
4. Pesar o anel de confinamento bem limpo.
5. Pesar três cápsulas limpas que serão usadas para a medição do teor de umidade inicial da amostra.
6. Arrumar todas as ferramentas necessárias para a montagem do ensaio (chave para apertar as porcas, peça para o ajuste do anel com o corpo de prova no oedômetro, ver figura 3.13., etc.), e os materiais (graxa de vaselina, água desaerada).

II. Preparação Corpo de Prova.

1. Pegar uma quantidade de material amassado e colocá-lo sobre uma superfície acrílica limpa.
2. Cravar aos poucos o anel de confinamento no material e ir cortando os remanescentes com cuidado para não formar trincas no corpo de prova.
3. Cortar as porções de material saliente, com o objetivo de que o corpo de prova tenha a mesma altura do anel de confinamento.
4. Limpar a parte exterior do anel
5. Com as porções de material remanescente preencher e pesar as cápsulas para medir o teor de umidade inicial do corpo de prova. Ver Figura 3.12

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.12 - Anel de confinamento com amostra e cápsulas com material para medir o teor de umidade inicial.

III. Montagem do ensaio

1. Na base do oedômetro introduzir água destilada e desaerada até garantir que a pedra porosa fique submersa em água, mas sem ultrapassar o nível superior da pedra.
2. Instalar a pedra porosa da parte inferior e logo depois o correspondente papel filtro.
3. Colocar a parte superior do oedômetro sem apertar as porcas.
4. Colocar o anel (que contém o corpo de prova) e ajustar com a peça especial para este ajuste (Ver Figura 3.13).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.13 - Peça para o ajuste do anel de confinamento, que contém o corpo de prova, no oedômetro.

5. Botar o anel de ajuste sobre o anel de confinamento
6. Botar o papel filtro sobre a parte superior do corpo de prova.
7. Botar o cap.
8. Apertar as porcas.
9. Aplicar, abundantemente vaselina no contanto entre o anel de ajuste e a parte superior do oedômetro (contato A).
10. Nivelar a superfície da prensa, onde se apoia o oedômetro, em uma altura apropriada para a montagem do ensaio.
11. Colocar o oedômetro na prensa e nivelar o braço da prensa (Ver Figura 3.14), e o suporte do extensômetro (o extensômetro deve ficar com o espaço suficiente para a realização das medições durante o ensaio todo).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.14 - Técnico fazendo o nivelamento da prensa tipo Bishop.

12. Por em contato o cap do oedômetro com a peça da prensa de adensamento que suporta o extensômetro. Ver Figura 3.15

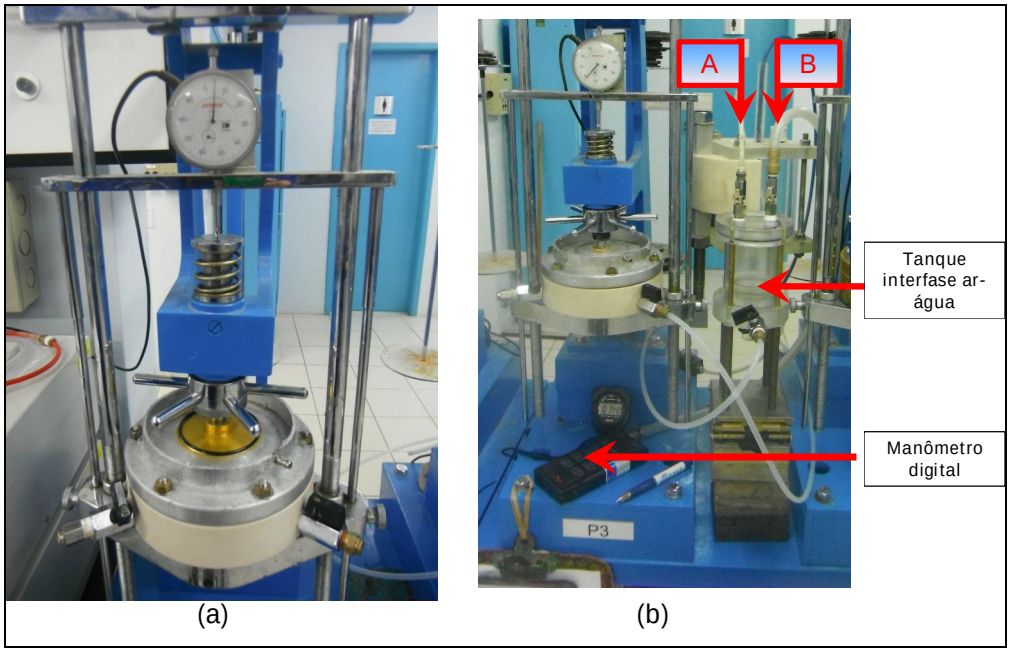


Figura 3.15 - Oedômetro montado na prensa tipo Bishop

(a) Pronto para o inicio de estágios convencionais com carregamento por pesos

(b) Pronto para o inicio de estágio de carregamento com vácuo

A. Ligação linha da pressão do vácuo.

B. Ligação do manômetro digital.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

IV. Ensaio

1. Botar água no contato B.
2. Fazer o primeiro estágio de carregamento com uma tensão de 3,75kPa (carga de nivelamento) durante um dia e tomar leituras de recalque.
3. Fazer estágios de carregamento convencionais com pesos para obter tensões de 10, 20, 40, 80 e 160kPa.
4. Tirar a água que há sobre o cap, secar bem esta superfície (com cuidado para não deformar o corpo de prova, nem de afetar a leitura do extensomêtro), e preencher com graxa de vaselina todo o espaço entre o a parte superior do cap. e o anel de ajuste, até um nível que cubra totalmente a parte superior do anel de ajuste.
5. Botar água desaerada no tanque da interface ar-água, aonde se ligará o sistema de vácuo até uma altura de ¼ da capacidade do tanque e saturar a mangueira, com a que vai ser feita a ligação ao oedômetro.
6. Ligar o tanque da interface ar-água a uma das válvulas da base do oedômetro e fechar a outra válvula, nivelar o tanque até que a interface ar-água fique a uma altura igual à metade da altura onde se encontra o corpo de prova.
7. Ligar o manômetro ao tanque da interface ar-água.
8. Ligar o sistema de vácuo com a válvula da entrada ao oedômetro fechada até que a pressão do vácuo se estabilize.
9. Uma vez que a pressão do vácuo se estabilize, abrir a válvula. Nesse momento começa o estágio de carregamento com vácuo (ativar o cronômetro).
10. O estágio termina quando a curva de porcentagem de deformação vs. raiz de tempo chega a uma forma na que se aprecie, claramente, que se estabilizou a inclinação em uma forma razoavelmente constante.
11. Nesse momento começa o estágio seguinte, que é o descarregamento do vácuo (tirar o vácuo). Este estágio começa desligando o sistema de vácuo do tanque da interface ar-água e ligando-o a atmosfera.
12. Fazer um estágio de carregamento com um carregamento igual à pressão de vácuo (80kPa) e posteriormente outro estágio com um carregamento do dobro da carga aplicada no corpo de prova nesse momento (2 x 240kPa = 480kPa).
13. Fazer estágios de descarregamento, ao menos dois para poder calcular o Cr.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

14. Desmontar o ensaio, medir a espessura final do corpo de prova (como dado para revisão dos resultados do ensaio) e medir o teor de umidade final.
15. Paralelamente a realização do ensaio, foram desenhadas as curvas (Porcentagem de deformação Vs. raiz de tempo, porcentagem de deformação Vs. logaritmo de tempo, índice de vazios Vs. logaritmo da tensão vertical, porcentagem de adensamento Vs. Tv, entre outras), e feitos os cálculos respectivos (índice de vazios inicial, c_v pelos diferentes métodos, etc.) para poder ir conhecendo os resultados.

3.1.5. Ensaios teste

3.1.5.1. Material usado para os ensaios teste

Foi usada uma argila fabricada com uma mistura de argilas de diferentes profundidades, obtidas em sondagens feitas na Baia de Guanabara, com adição de água.

As características deste material remoldado são apresentadas na tabela 3.1. e na figura 3.16.

Tabela 3.1 - Caracterização material usado nos ensaios teste

Característica	Valor	Unidade
Limite de liquidez (LL)	75	%
Limite de plasticidade (LP)	26	%
Índice de plasticidade (IP)	49	%
Teor de matéria orgânica	4,45	%
Massa específica real dos grãos	2,65	g/cm3
Fração granulométrica		
Argila (% peso)	27,70	%
Silte (% peso)	28,00	%
Areia (% peso)	44,30	%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

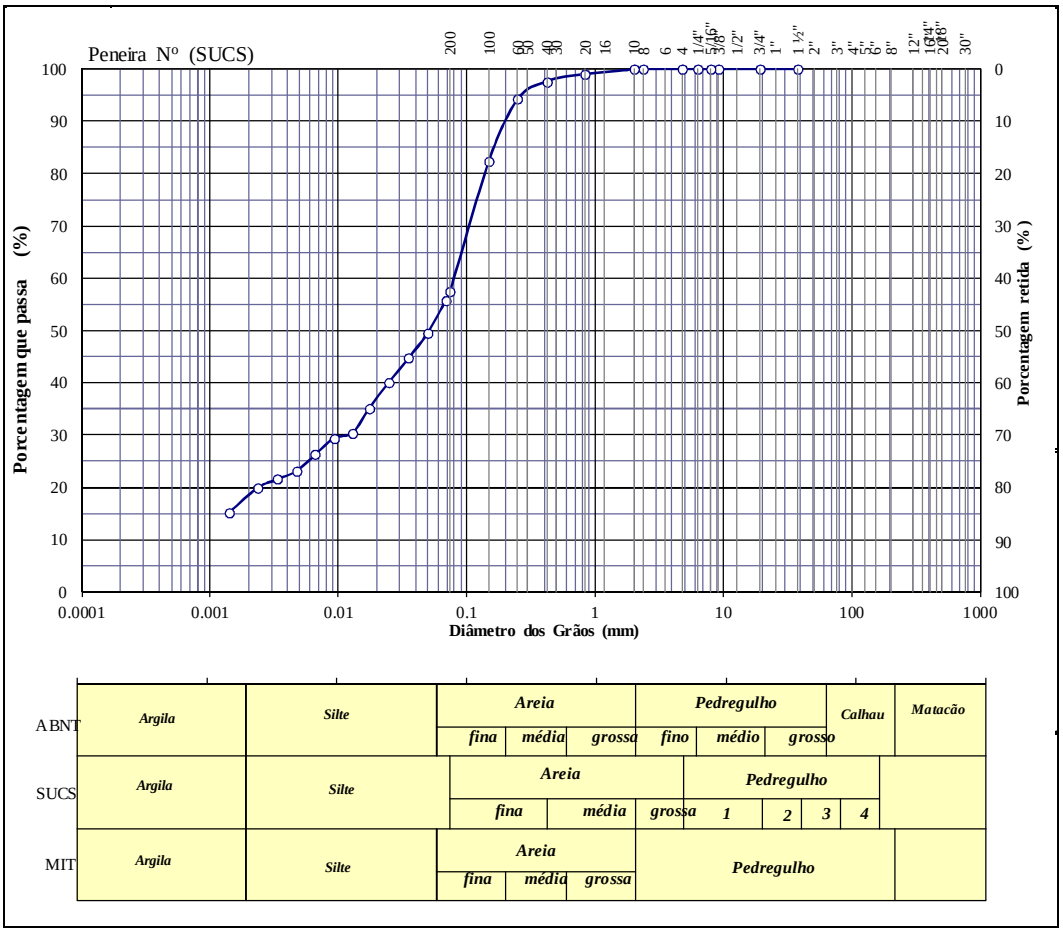


Figura 3.16 - Curva granulométrica material usado nos ensaio s teste

3.1.5.2. Resultados obtidos nos ensaios teste

Para o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio, foram feitos vários testes, nos quais se apresentaram dificuldades e problemas que obrigaram a fazer mudanças na metodologia e realizar mais ensaios para testar novas técnicas que permitissem chegar a soluções. Assim, foi obtida uma metodologia satisfatória por via de ensaio e erro, o que permitiu conhecer, não somente como fazer o ensaio, mas também como não fazer. Muitos resultados foram descartados pelos problemas apresentados nos ensaios. Os resultados do primeiro ensaio satisfatório são apresentados à seguir.

O ensaio V-6 é um ensaio de 14 estágios, onde o estágio 7 é feito com vácuo; no estágio 8 o vácuo é desligado e a linha por onde drena água do corpo de prova é ligada à pressão atmosférica. A Tabela 3.2 apresenta as características iniciais e finais do material testado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.2 - Características iniciais e finais do material testado no ensaio No. 6.

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio
Dissertação de Mestrado em Geotecnia
Titulo: "Utilização de vácuo em laboratório para ensaios de adensamento com carregamento unidimensional e isotrópico para material remoldado"

Ensaio adensamento com vácuo na prensa de adensamento

ENSAIO No.	V-6

Caraterísticas material testado		
Material:	Mescla Argilas mole da Bahia de Guanabara	
Data moldagem	14-ago-12	
Peso Específico da água	1.00	g/cm3
Umidade Inicial	63.54%	%
Peso Específico Total Inicial	1.589	g/cm^3
Peso Específico dos Grãos	2.650	g/cm^3
Índice de Vazios Inicial	1.727	
Grau de Saturação inicial	97.52%	%
Altura de Sólidos - Ho	0.7284	cm
Umidade Final	39.80%	%

A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.3 - Resultados ensaio No. 6.

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia

Titulo provisional: "Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Ensaio adensamento com vácuo na prensa de adensamento

Resultado dos Estágios

ENSAIO No.	V-6

Presssão de pré-adensamento	σ´vm (kPa)
Casagrande	9.72
Pacheco Silva	7.95

Parametros de compressibilidade	
Cc	0.221
Cr	0.036

$$k = \gamma_w \cdot m_v \cdot C_v$$

γw 9.81 kN/m3

	Estágio de carga No.	Pressão kPa	Duração estágio (horas)	Recalque acumulado cm	Altura CP mm	Altura CP cm	Índice de Vazios	Cv - Taylor cm^2/seg	Cv - Casagrande cm^2/seg	Cv - Ajuste curva Tv Vs.U (%) cm2/seg -V6, BG (COM VÁCUO)	a_v (1 /kPa)	m_v (1 /kPa)	k (cm/s)
	0	0.00		0.000	19.860	1.986	1.727	-	-	-			
C	1	3.76	14.72	0.067	19.193	1.919	1.635	6.66E-05	8.39E-05	7.00E-05	0.024	0.009	6.13E-08
C	2	10.03	8.33	0.131	18.547	1.855	1.546	6.61E-05		7.00E-05	0.014	0.005	3.69E-08
C	3	20.06	16.00	0.216	17.698	1.770	1.430	8.28E-05	6.86E-05	6.90E-05	0.012	0.005	3.09E-08
C	4	40.10	48.30	0.325	16.609	1.661	1.280	7.15E-05	5.72E-05	7.50E-05	0.007	0.003	2.26E-08
C	5	80.22	24.10	0.436	15.498	1.550	1.128	9.24E-05	7.26E-05	1.00E-04	0.004	0.002	1.64E-08
C	6	160.42	100.48	0.578	14.077	1.408	0.933	1.24E-04	1.18E-04	1.50E-04	0.002	0.001	1.68E-08
V	7V	240.43	28.00	0.646	13.399	1.340	0.840	3.85E-04		2.00E-04			
D	8	160.43	20.33	0.637	13.490	1.349	0.852						
C	9	240.64	24.35	0.657	13.290	1.329	0.825						
C	10	481.28	25.27	0.820	11.661	1.166	0.601	7.95E-04	5.35E-04	8.00E-04	0.001	0.001	4.00E-08
D	11	240.64	22.87	0.775	12.115	1.212	0.663						
D	12	80.21	3.33	0.727	12.592	1.259	0.729						
D	13	40.10	3.73	0.691	12.953	1.295	0.778						
D	14	10.03	16.28	0.622	13.645	1.365	0.873						

A Figura 3.17 apresenta a curva % de deformação Vs. raiz quadrada de tempo (método de Taylor), obtida no estágio 7V feito com vácuo.

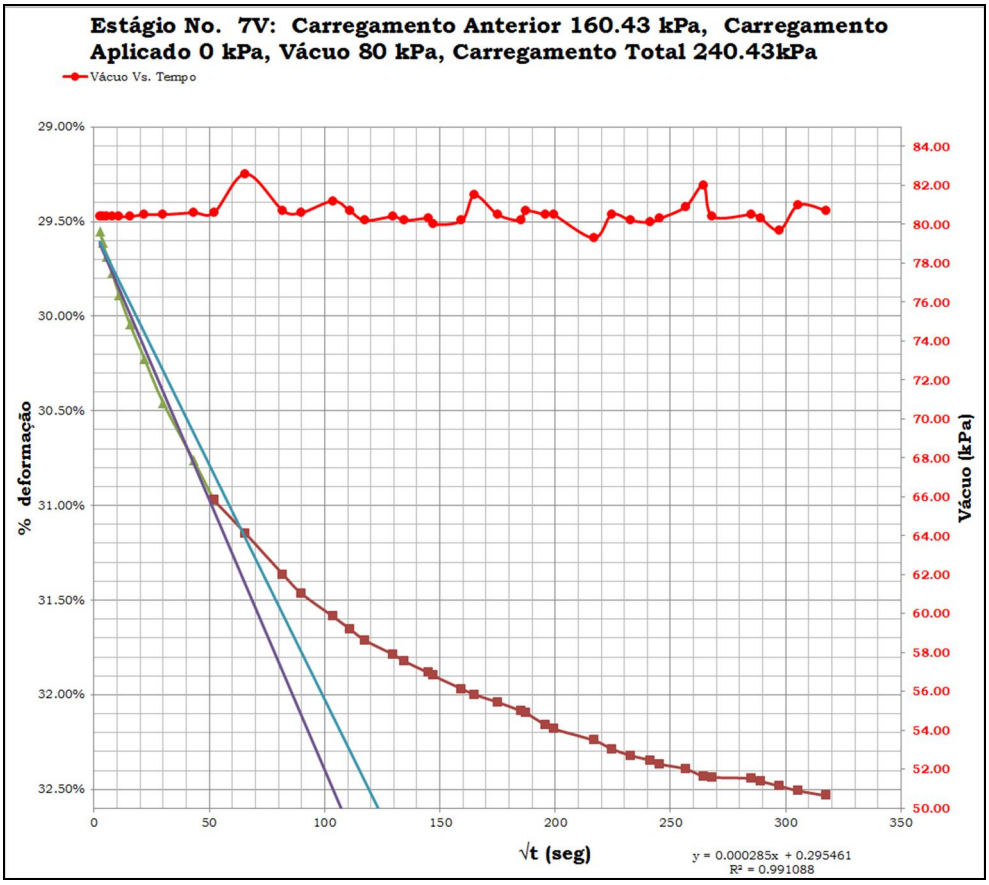


Figura 3.17 - Curva % deformação Vs. raiz de tempo para o estágio com pressão de vácuo, ensaio No. 6.

A Figura 3.18 apresenta a curva de índice de vazios Vs. Log σ`v, onde pode-se observar que o estágio 7V tem um comportamento bastante similar aos outros estágios feitos com carregamento convencional.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

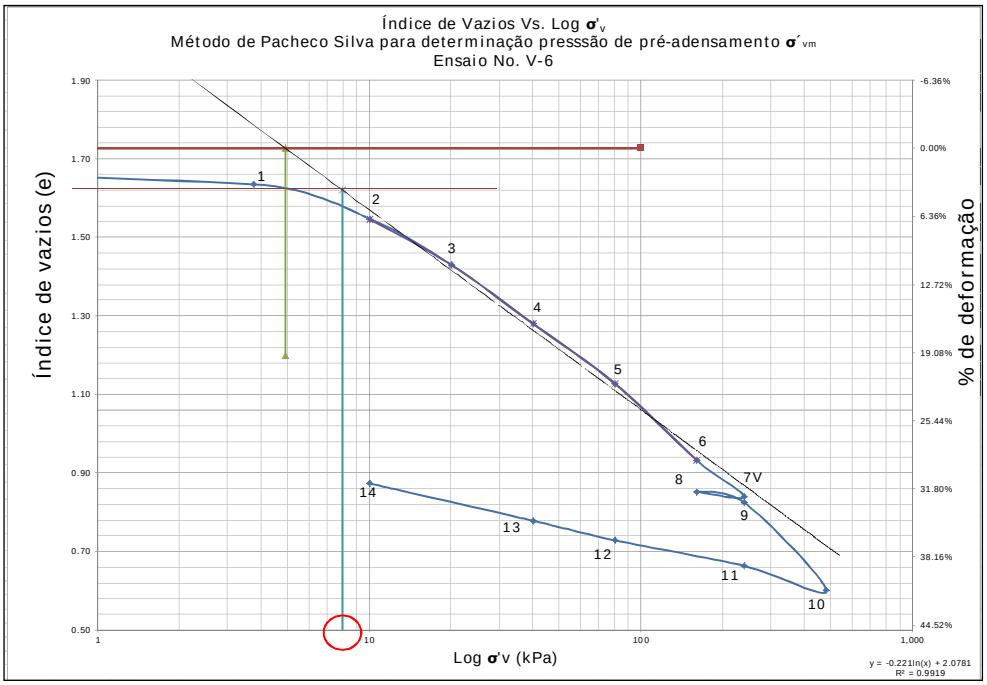


Figura 3.18 - Curva e Vs. Log σ'v para o ensaio No. 6

O estágio 9, é feito com pesos que equivalem ao valor da pressão do vácuo (≈80kPa), obtendo-se um índice de vazios final bastante similar ao obtido no final do estágio 7V.

O ensaio V-7 foi feito em um oedômetro convencional com as mesmas tensões verticais usadas no ensaio V-6 para comparação de resultados. Na Tabela 3.4 apresentam-se as características iniciais e finais do material usado neste ensaio. Os resultados deste ensaio se apresentam na tabela 3.5. A Figura 3.19. apresenta a curva de índice de vazios Vs. Log σ`v obtida neste ensaio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.4 - Características iniciais e finais do material testado no ensaio No. 7.

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia

Titulo: "Utilização de vácuo em laboratório para ensaios de adensamento com carregamento unidimensional e isotrópico para material remoldado"

Ensaio adensamento com vácuo na prensa de adensamento

ENSAIO No.	V-7

Caraterísticas material testado		
Material:	Mescla Argilas mole da Bahia de Guanabara	
Data moldagem	29-ago-12	
Peso Específico da água	1.00	g/cm3
Umidade Inicial	62.56%	%
Peso Específico Total Inicial	1.589	g/cm^3
Peso Específico dos Grãos	2.650	g/cm^3
Índice de Vazios Inicial	1.712	
Grau de Saturação inicial	171.16%	%
Altura de Sólidos - Ho	0.7320	cm
Umidade Final	36.91%	%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.5 - Resultados ensaio N. 7.

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia

Titulo provisional: "Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Ensaio adensamento com vácuo na prensa de adensamento

Resultado dos Estágios

ENSAIO No.	V-7

Presssão de pré-adensamento	σ´vm (kPa)
Casagrande	11.97
Pacheco Silva	8.66

Parametros de compressibilidade	
Cc	0.216
Cr	0.027

$$k = \gamma_w \cdot m_v \cdot C_v$$

γw 9.81 kN/m3

	Estágio de carga No.	Pressão kPa	Duração estágio (horas)	Recalque acumulado cm	Altura CP mm	Altura CP cm	Índice de Vazios	Cv - Taylor cm^2/seg	Cv - Casagrande cm^2/seg	Cv - Ajuste curva Tv Vs.U (%) cm2/seg - V7, BG - (SEM VÁCUO)	a_v (1 /kPa)	m_v (1 /kPa)	k (cm/s)
	0	0.00		0.000	19.850	1.985	1.712	-	-	-			
C	1	3.75	15.733	0.100	18.851	1.885	1.575						
C	2	10.00	23.900	0.172	18.132	1.813	1.477	6.02E-05	6.89E-05	7.00E-05	0.016	0.006	4.19E-08
C	3	20.02	25.333	0.247	17.383	1.738	1.375	6.48E-05	5.85E-05	6.90E-05	0.010	0.004	2.79E-08
C	4	40.02	26.650	0.340	16.448	1.645	1.247	8.11E-05	7.36E-05	8.00E-05	0.006	0.003	2.11E-08
C	5	80.06	20.417	0.455	15.302	1.530	1.090	9.62E-05	8.18E-05	8.00E-05	0.004	0.002	1.37E-08
C	6	160.12	23.850	0.574	14.114	1.411	0.928	1.21E-04	1.09E-04	1.30E-04	0.002	0.001	1.24E-08
C	7	240.17	23.667	0.643	13.424	1.342	0.834	1.14E-04	6.22E-05	8.00E-05	0.001	0.001	4.79E-09
D	8	160.11	26.383	0.636	13.494	1.349	0.843						
C	9	240.17	24.150	0.648	13.370	1.337	0.826						
C	10	480.34	28.567	0.767	12.185	1.219	0.665	1.93E-04	1.11E-04	2.00E-04	0.001	0.000	7.24E-09
D	11	240.17	18.350	0.749	12.359	1.236	0.688						
D	12	40.03	46.633	0.683	13.018	1.302	0.778						

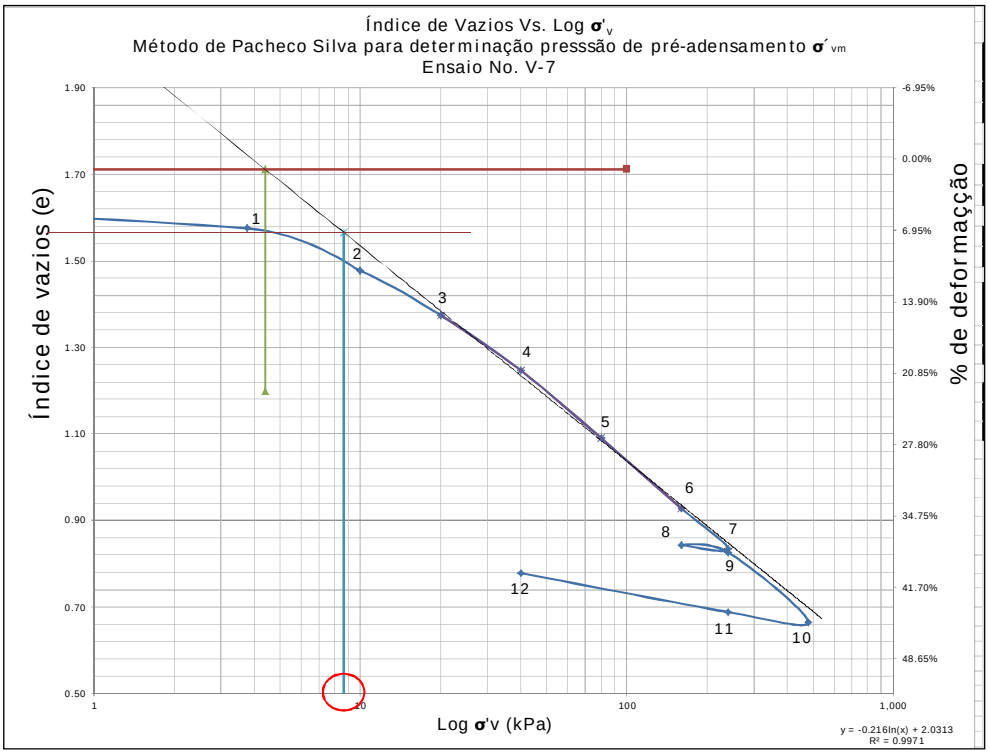


Figura 3.19 - Curva e Vs. Log σ'v para o ensaio No. 7.

A comparação das curvas de índice de vazios Vs. Log σ`v do ensaio V-6 e o ensaio V-7 se apresentam na Figura 3.20. É evidente que estas duas curvas têm muita semelhança.

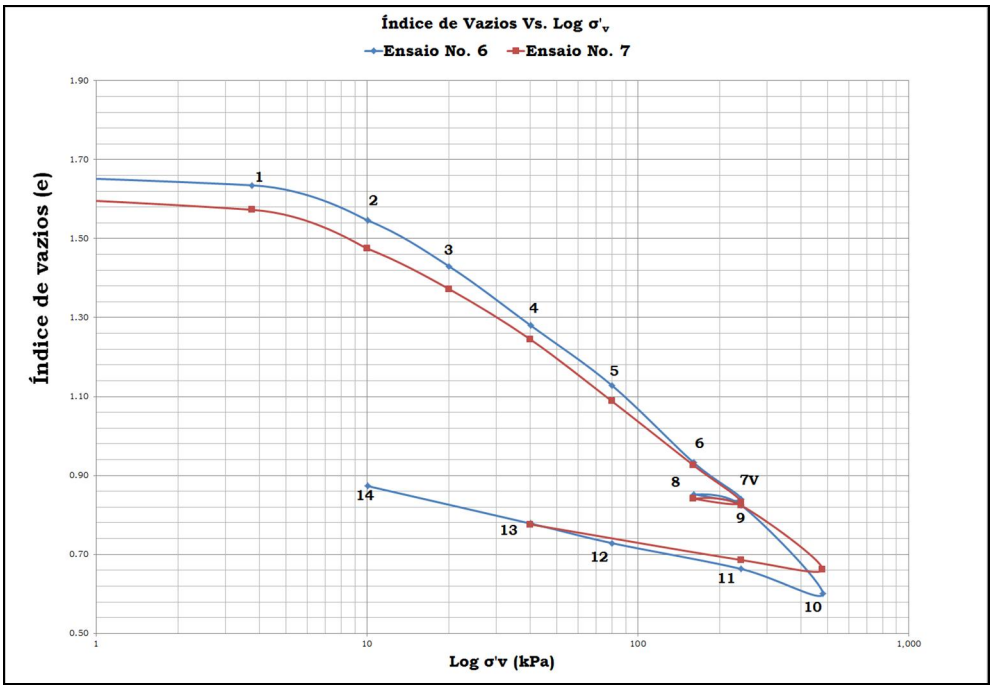


Figura 3.20 - Comparação entre as curvas e Vs. Log σ'v do ensaio No. 6 (com estágio 7V com vácuo) e do ensaio No. 7 (sem vácuo).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

3.2.
Ensaio de adensamento isotrópico, na célula triaxial.

Neste ensaio de adensamento isotrópico é feito com drenagem por um dos extremos do corpo de prova (neste trabalho pela base) e medição de poro pressão no outro extremo (neste trabalho pelo topo).

Com este ensaio busca-se conhecer o comportamento da variação de poro pressão ao longo do tempo em um corpo de prova. O transdutor para medição de pressões, fornecido pelo laboratório para este ensaio tinha um limite máximo de leitura de pressão de vácuo de -50kPa. O que fornecia um intervalo baixo de variação de poro pressão (0 a -50kPa) para o estudo. Então optou-se por aplicar uma tensão de confinamento, sob condições não drenadas de 200kPa, para aumentar o valor da poro pressão e assim ter um intervalo de variação de poro pressões maior (200 a -50kPa). Além disso, é necessário, aplicar uma pressão confinante sob condições não drenadas para medir o B de Skeptom, o que também ajuda, ainda que não seja o objetivo do ensaio, ao sistema de medição de variação de volume usado a dissolver bolhas de ar que possam ter ficado presas no interior da célula (ver item 3.2.2.2.). Como foi observado no ensaio na prensa tipo Bishop, aplicar uma tensão antes da aplicação da pressão de vácuo permite evitar a formação de trincas no corpo de prova.

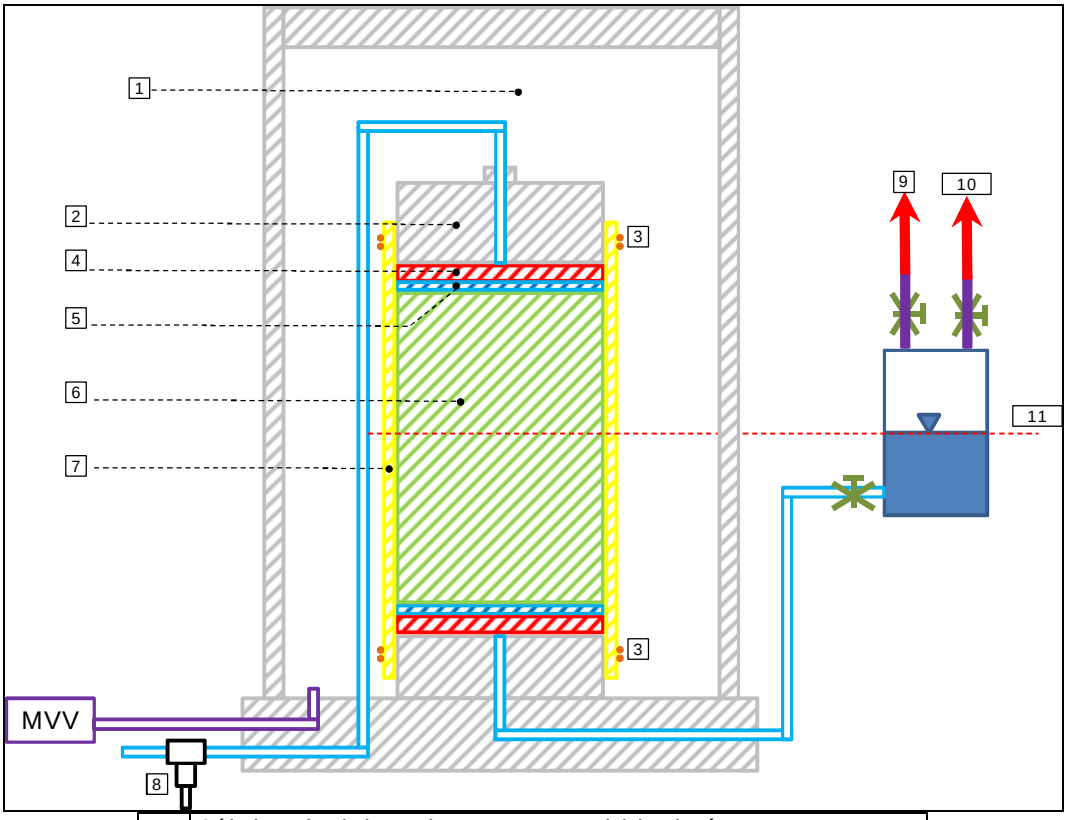
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

3.2.1.
Objetivo do ensaio

O objetivo deste ensaio é conhecer a variação da poro pressão ao longo do tempo em corpos de prova de diferentes alturas, durante um processo de adensamento produzido pela ação conjunta de carregamento por tensão de confinamento triaxial e vácuo aplicado na base do C.P. (corpo de prova) com leituras de poro pressão no topo do C.P.

3.2.2.
Esquema montagem do ensaio

Na Figura 3.21 se apresenta o esquema da montagem do ensaio na célula triaxial.



1	Célula triaxial totalmente preenchida de água
2	Topo onde são feitas as medições de poro pressão
3	Orings para segurar membrana de borracha
4	Pedra porosa
5	Papel filtro
6	Corpo de prova (C.P.)
7	Membrana de borracha
8	Transdutor de poro pressão
9	Ligação manomêtro para controle da pressão de vácuo
10	Ligação a sistema de vácuo
11	Interfase ar-água nivelada com o centro da altura do C.P.

Figura 3.21 - Esquema montagem do ensaio na célula triaxial

3.2.3.
Dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do ensaio

3.2.3.1.
Tempo do ensaio (aquisição de dados)

No objetivo desde ensaio está contemplado ensaiar corpos de prova de diferentes alturas, foram escolhidas três alturas de 3, 4.5 e 6cm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

O material testado tem um c_v de $4x10^{-4}$ cm^2/s, usando a equação para cálculo de tempo de adensamento, $t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v}$ e usando a maior altura hC.P.= 6cm, para completar um adensamento de 99.1% para o qual corresponde um fator tempo (Tv) de 2, para adensamento isotrópico (Bishop e Henkel) , obtém-se um tempo de 50 horas. Para a menor altura $h_{C.P}$ = 3cm, obtém-se um tempo de 12.5 horas. Estes tempos são grandes para tomar leituras com instrumentos sem aquisição de dados eletrônico. Instrumentos para tomada de leituras por meio visual não são adequados (ver Figura 3.22), porque para a plotagem da curva de variação de poro pressão ao longo do tempo e de variação volumétrica são necessários vários pontos em intervalos de tempo máximo de uma hora. Sendo assim, não é apropriado que um único técnico faça esta tomada de leituras durante todo tempo que o ensaio demora, tornando-se fundamental a utilização de instrumentos ligados a sistemas de aquisição de dados computorizados.

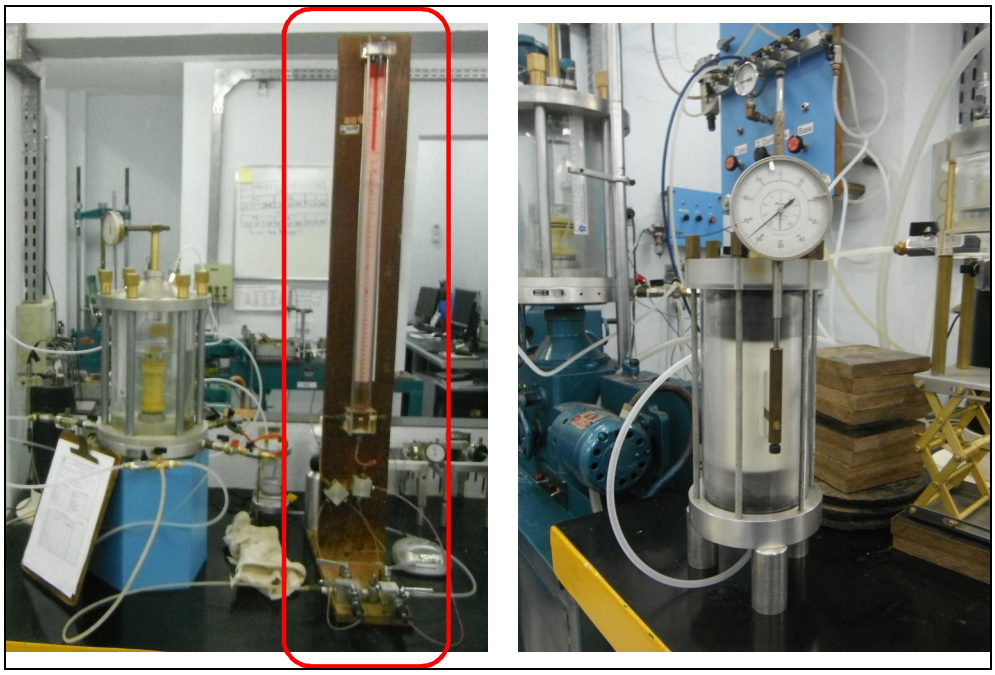


Figura 3.22 - Instrumentos para medição de variação volumétrica de leitura visual, inadequados para um ensaio de altos tempos de duração.

3.2.3.2. Medição da variação de volume

Medir a variação de volume não é o objetivo deste ensaio, no entanto, tentou-se desenvolver uma metodologia que permitisse fazer esta medição com os recursos disponíveis e as condições que se tinham no laboratório, obtendo-se uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

metodologia que tem limitações e que embora não tenha uma alta precisão, fornece resultados com comportamentos lógicos.

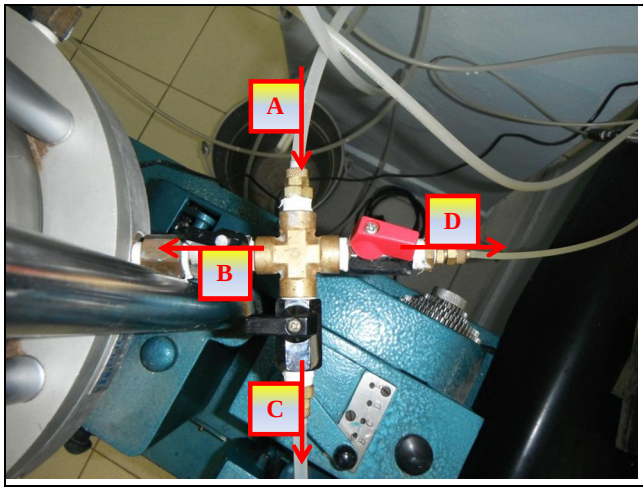
Descrição da metodologia

Os instrumentos para medição de variação de volume nos ensaios triaxiais drenados convencionais para materiais saturados trabalham medindo o volume de água que sai do corpo de prova. Neste ensaio a água sai do corpo de prova pela mesma linha por onde é ligado o vácuo. Submeter um instrumento de medição de variação de volume de borrachas de Bellofram (que geralmente trabalham com uma pressão positiva ou contrapressão) a uma pressão negativa (de vácuo) pode danificar o mecanismo do instrumento, o que levaria a obter leituras erradas.

Optou-se então, trabalhando com a célula totalmente preenchida de água, por fazer a medição da variação de volume medindo a quantidade de água que entra na célula.

Descrição do Funcionamento do Sistema de Medição de Variação Volumétrica do C.P.

1. Abrir a válvula do reservatório de água destilada.
2. Abrir a válvula B para preencher a célula (Ver Figura 3.23).



A. Do reservatório de agua destilada
B. Para a célula
C. Para o transdutor (medição tensão confiante)
D. Para o MVV

Figura 3.23 - Válvulas que ligam célula, reservatório, transdutor e o MVV.

3. Preencher totalmente a célula, com água destilada (Ver Figura 3.24).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

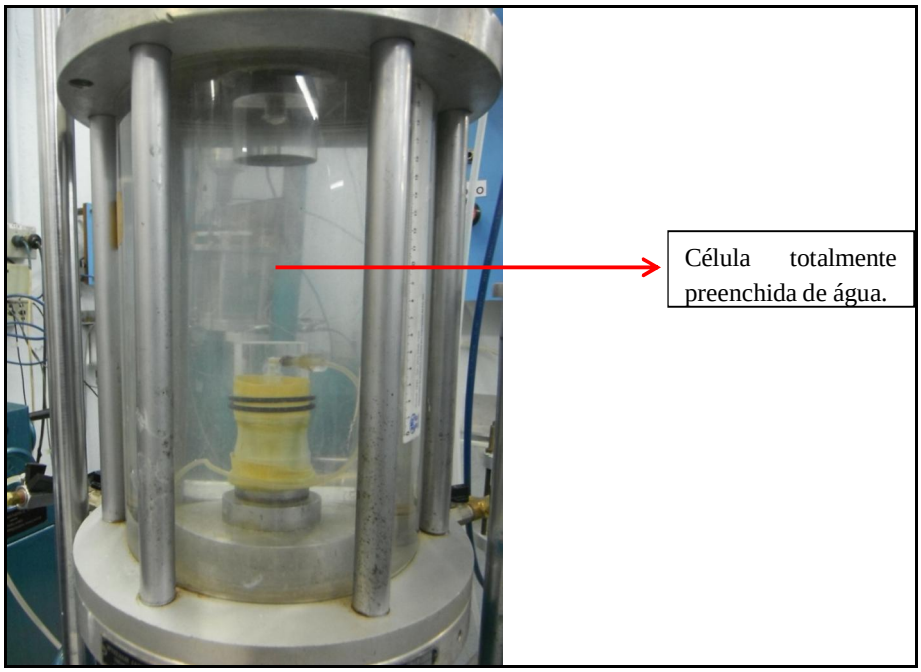


Figura 3.24 - Célula totalmente preenchida de água

4. Fechar a válvula do reservatório
5. Aplicar tensões confinantes para a medição do B de Skempton do C.P. (Ver 3.2.4. Procedimento do ensaio). É aplicada pressão ao ar da parte inferior do instrumento para medição de variação de volume (MVV) (Ver Figura 3.25. e Figura 3.26). Esta pressão é transmitida à água da parte superior do MVV. Tendo abertas as válvulas D e B (Ver Figura 3.23), a pressão chega à água do interior da célula.

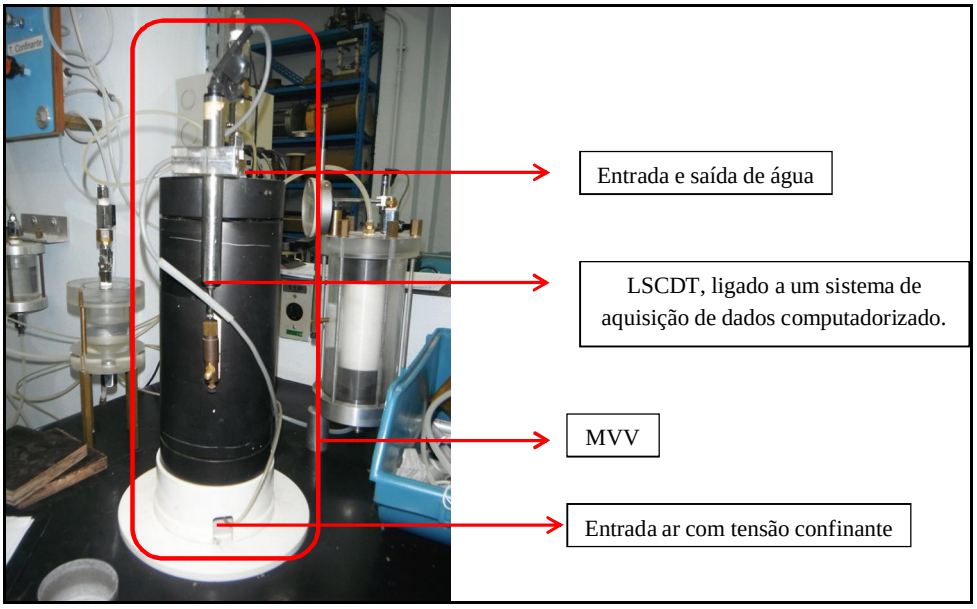


Figura 3.25 - Instrumento para a medição da variação volumétrica (MVV).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

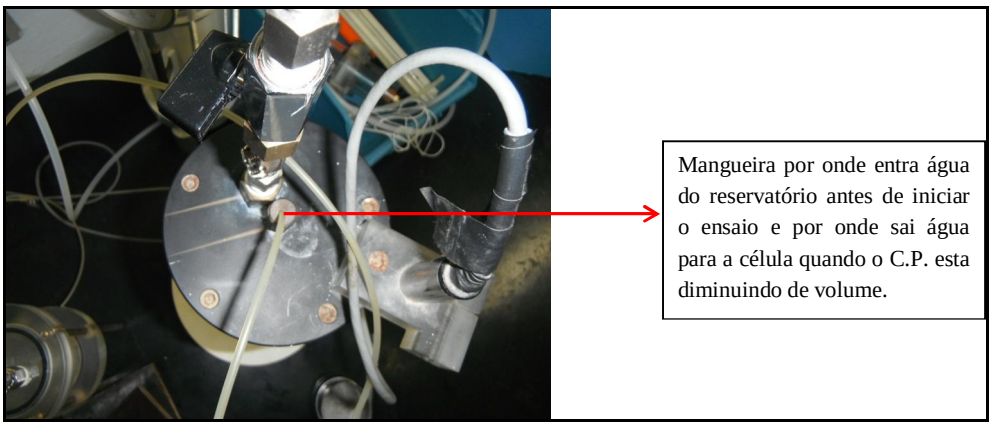


Figura 3.26 - Vista superior do instrumento para medição da variação volumétrica (MVV).

6. Aplicar tensão confinante do ensaio (200kPa, que é constante durante todo o ensaio).
7. Esperar 24 horas, mantendo constante a tensão confinante de 200kPa, o que vai permitir que as poucas bolhas de ar que estejam presas no topo da célula se dissolvam na água destilada e que o Creep da célula se estabilize, levando em conta os ensaios realizados para medição do creep da célula e cujos resultados se apresentam na Figura 3.27.

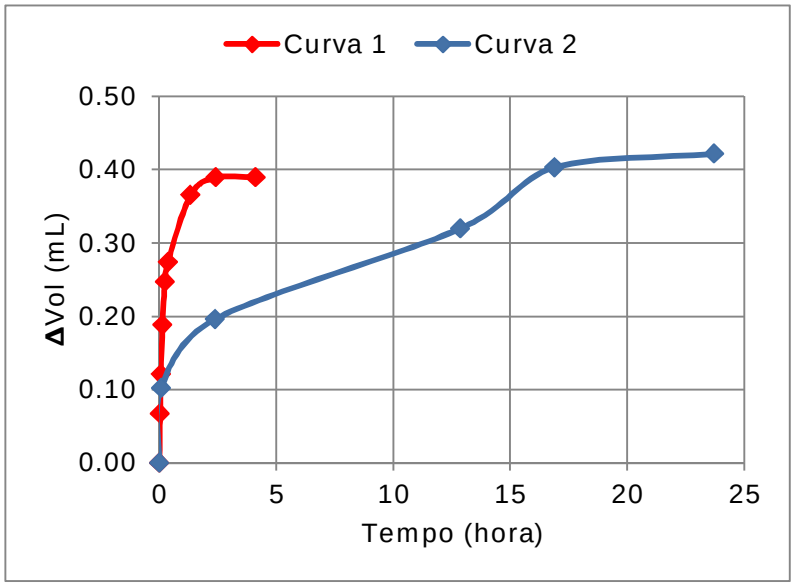


Figura 3.27 - Resultados de dois ensaios de medição do Creep da célula triaxial ao longo do tempo com uma pressão de confinamento constante de 200kPa.

8. Abrir a válvula que liga a base do C.P. ao tanque onde é ligada a pressão de vácuo (Ver 3.2.4. Descrição do procedimento do ensaio). Nesse momento começa a sair água do C.P. e, portanto, começa a diminuir de volume, volume esse que passa a ser ocupado por água que sai do MVV para entrar na célula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

9. As leituras registradas pelo MVV correspondem à quantidade de água que saiu do MVV para entrar na célula, para ocupar o volume que ocupava a água que saiu do C.P.

Limitações deste sistema

Em seguida há uma numeração das limitações deste sistema de medição da variação de volume que é necessário estudar detalhadamente para ter um melhor controle destas variáveis e assim melhorar a precisão das medições.

1. Sensibilidade do instrumento à variação de temperatura ambiente no interior do laboratório
2. Sensibilidade do acrílico da célula à variação de temperatura ambiente no interior do laboratório
3. Creep da célula durante todo o tempo que demora o ensaio
4. Presença de bolhas de ar no interior do topo da célula, em espaços, que pela geometria, são difíceis de enxergar.
5. Creep das mangueiras que ligam as conexões do equipamento.

3.2.3.3. Saturação e limpeza das linhas

A presença de bolhas de ar nas linhas atrapalha a medição das pressões (confinamento, poro pressão), fazendo com que os tempos de estabilização destas medições, para poder tomar as leituras, sejam maiores, além de que podem afetar o valor das medições. O equipamento, inicialmente, tinha as mangueiras de cor vermelha (ver Figura 3.28) o que não permitia ver a presença de bolhas de ar. Foram trocadas as mangueiras por outras transparentes que permitiram fazer a saturação das linhas com melhor efetividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

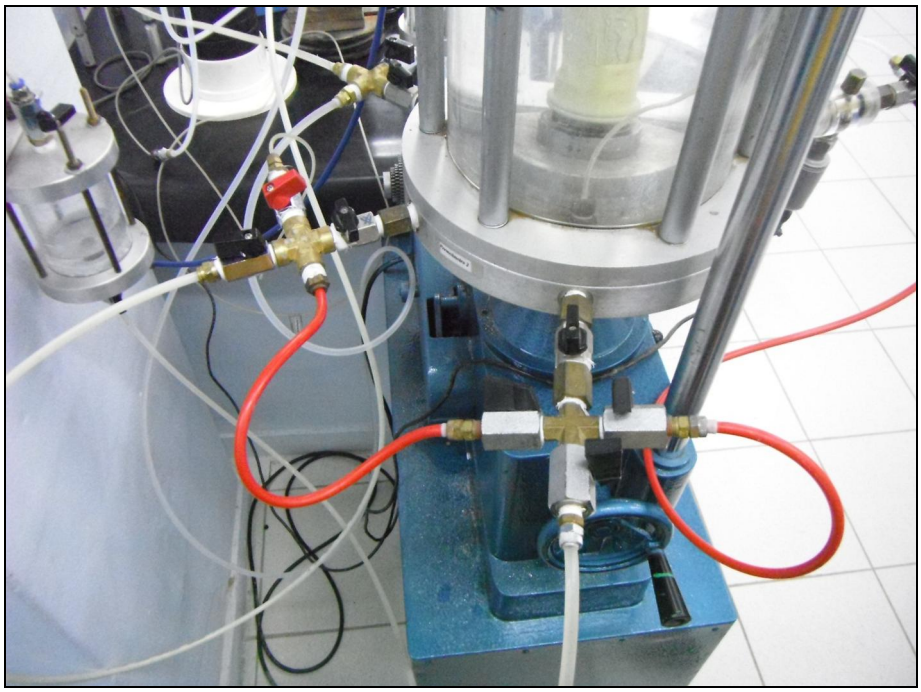


Figura 3.28 - Mangueiras inadequadas de cor vermelha que impedem observar a presença de bolhas de ar nas linhas.

Quando era realizada a saturação das linhas observou-se nas saídas que a vazão de água em algumas era inferior. Inicialmente achou-se que isso não afetaria o ensaio, mas durante a realização de alguns ensaios as linhas ficavam entupidas. Como não é possível desentupir as linhas com o ensaio em andamento, perderam-se alguns ensaios. As linhas eram desentupidas com água a pressão, observando-se que não saía nada (não tinha partículas de solo, nem qualquer outro material).

Depois de alguns ensaios perdidos deste jeito, procedeu-se a desarmar as peças do equipamento onde se encontravam as ligações das linhas e foi feita uma limpeza mais profunda. Encontrou-se um material branco acumulado. Depois de retirar este material e armar o equipamento conseguiu-se, em todas as saídas das linhas, a mesma vazão, solucionando definitivamente o problema do entupimento das linhas.

3.2.4.
Descrição do procedimento do ensaio

I. Preparação do equipamento e dos acessórios

1. Cortar papel filtro com o diâmetro do C.P.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2. Saturar o papel filtro e as pedras porosas.
3. Avaliar que o comprimento da membrana esteja em acordo com o comprimento do C.P.
4. Testar que a membrana não tenha nenhum furo por onde possa entrar água ao C.P, ver Figura 3.29.

Figura 3.29 - Teste para detectar presença de furos na membrana

5. Saturar as linhas do equipamento (verificando visualmente que nas mangueiras transparentes não tenham bolhas de ar).
6. Verificar que o reservatório de água destilada possui a quantidade suficiente para encher toda a célula triaxial.

II. Moldagem corpo de prova (material remoldado)

7. Pesar três cápsulas vazias para medição do teor de umidade inicial.
8. Pegar um volume de material de dimensões maiores as do corpo de prova a ensaiar.
9. Montar o volume de material em um moldador e cortar o material com cuidado até obter o diâmetro do corpo de prova (3.81cm), ver Figura 3.30.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.30 - Moldagem corpo de prova.

10. Colocar o C.P. em um berço (com o diâmetro do C.P.), retirando o C.P. do moldador, com o maior cuidado para não afetar a geometria.
11. Cortar o C.P. com corda de violão a longitude necessária.
12. Botar parte das porções cortadas do material nas cápsulas para a medição do teor de umidade inicial. Ver Figura 3.31.
13. Pesar o berço com o C.P. e as cápsulas para a medição do teor de umidade inicial.

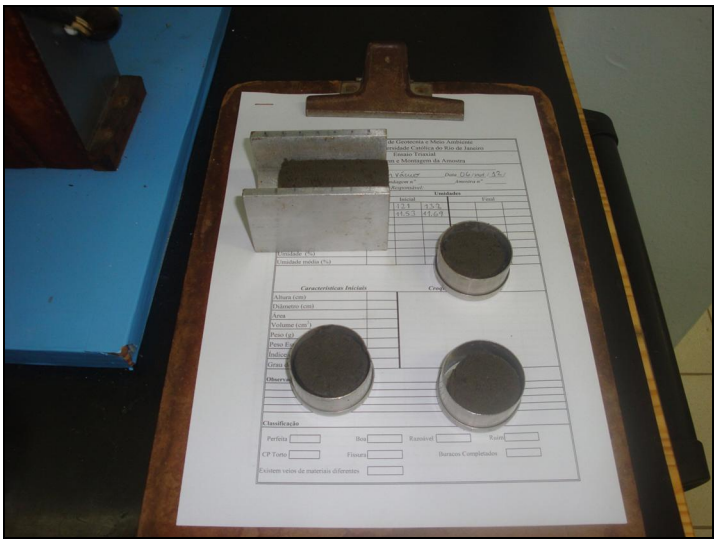


Figura 3.31 - Corpo de Prova cortado no comprimento necessário no berço e cápsulas para a medição do teor de umidade inicial.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

III. Montagem do C.P.

1. Colocar a pedra porosa e o papel filtro na base.
2. Colocar o C.P. na base com o maior cuidado.
3. Ingressar no C.P. o tubo bipartido com a membrana, fazendo sucção para colar a membrana às paredes do tubo para que a membrana não toque o C.P. enquanto o tubo ingressa. Ver Figura 3.32.

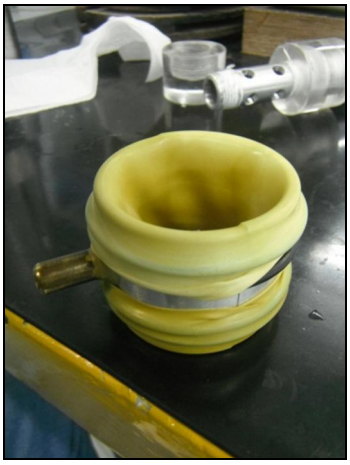


Figura 3.32 - Membrana em tubo bipartido pronta para a instalação no C.P.

4. Botar papel filtro, pedra porosa e o cap no topo do corpo de prova.
5. Esticar os extremos da membrana e botar o-rings de borracha para segurar a membrana cuidadosamente para não afetar o C.P. Ver Figura 3.33.

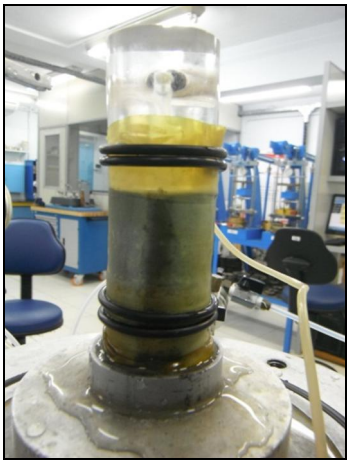


Figura 3.33 - C.P. montado.

6. Fechar a célula e encher a célula totalmente (ver 3.2.2.2. Descrição do Funcionamento do Sistema de Medição de Variação Volumétrica do C.P. e Figura 3.34).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.34 - Parte superior da célula triaxial

IV. Ensaio

1. Medir o B de Skempton

- Aplicar uma tensão confinante (σ_c) de 100kPa (não drenado), ver Figura 3.35.

Figura 3.35 - Tabuleiro de válvulas para regulagem das pressões na célula triaxial

- Medir a poro pressão na linha 1 da base, ver Figura 3.36.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

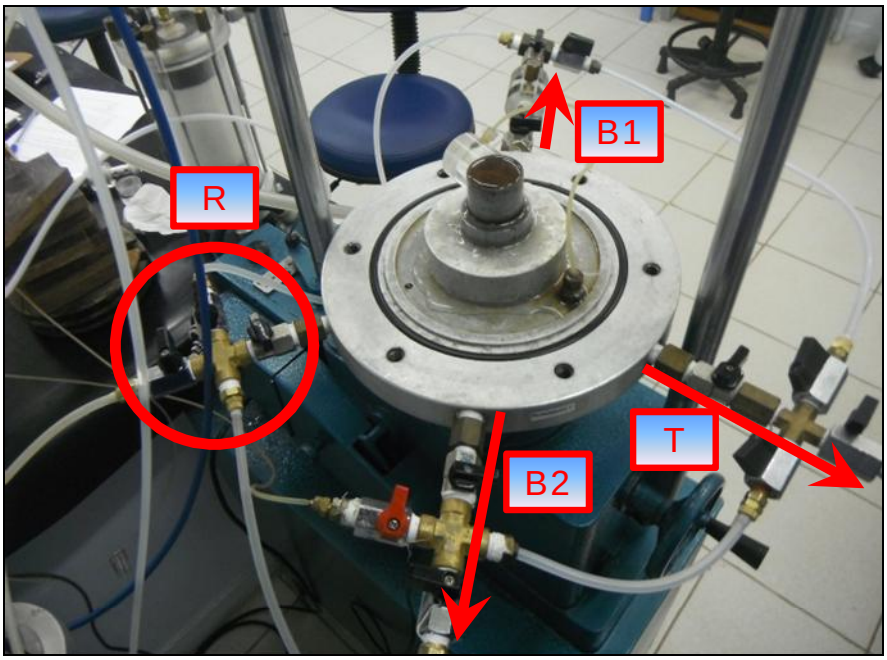


Figura 3.36 - Base do equipamento triaxial antes da montagem do C.P.
B1: Linha 1 da base e do transdutor para medir pressões.
B2: Linha 2 da base
T: Linha do Topo
R: Conexões do Reservatório, MVV e da célula (Ver figura 3.21.)

- Aplicar uma tensão confinante de σ_c = 120kPa (não drenado).
- Medir a poro pressão na linha 1 da base.
- Cálcular o B de Skempton, (tem que ser maior a 98%, se não, é necessário fazer procedimentos para saturação do C.P. por percolação ou por tensão efetiva).

2. Aplicar tensão confinante do ensaio.

- Aplicar tensão confinante de σ_c = 200kPa, não drenado.
- Medir poro pressão na linha 1 da base.
- Medir poro pressão na linha do topo.
- Esperar 24 horas, (ver 3.2.2.2. Medição da variação de volume).

3. Aplicar a pressão de vácuo

- Ligar a linha da base 2 ao tanque de interface ar-água.
- Com a válvula de saída do tanque da interface ar-água fechada, ligar a linha de pressão de vácuo e o manômetro digital ao tanque da interface ar-água. Ver Figura 3.37.
- Depois que a leitura da pressão do vácuo no manômetro digital se estabilizar em um valor fixo, regular a pressão a 80kPa.
- Nivelar a interface ar-água até que fique a uma altura igual à metade da altura do C.P.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

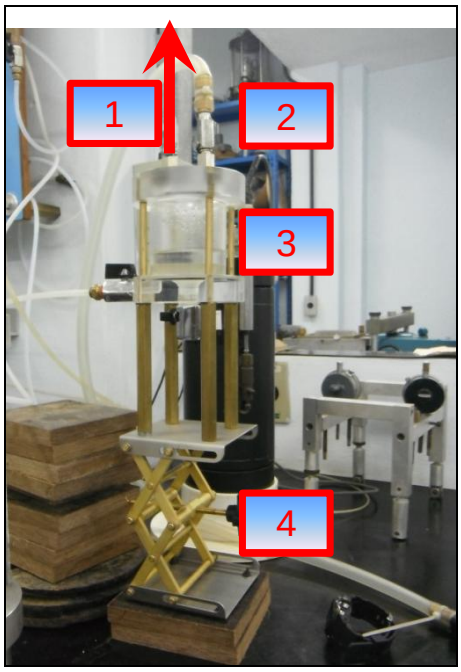


Figura 3.37 - Ligações no tanque da interface ar-água
1. Ligação linha da pressão do vácuo
2. Ligação do manômetro digital
3. Interface ar-água
4. Base pantográfica para nivelar a interface ar-água até a metade da altura do C.P.

- Abrir ao mesmo tempo a válvula de saída do tanque da interface ar-água e a válvula da linha 2 da base, ficando ligada a pressão de vácuo na base do C.P.
- Registrar as seguintes leituras durante o tempo necessário para que a poro pressão se estabilize:
    - Tempo
    - Poro pressão no topo
    - Pressão do vácuo
    - Variação volume do C.P.

Na Figura 3.38 se mostra um corpo de prova deformado durante o ensaio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

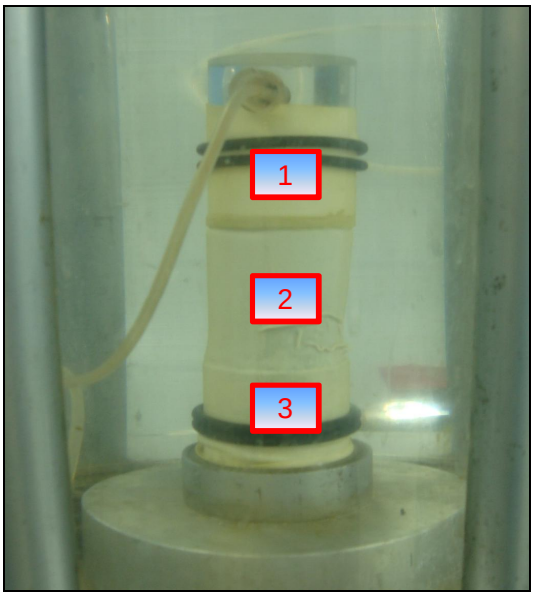


Figura 3.38 - Corpo de Prova adensado por a ação conjunta da tensão confinante e a pressão vácuo.

1. As leituras de poro pressão são tomadas no topo do C.P.
2. Corpo de prova (C.P.)
3. A pressão de vácuo é aplicada na base do C.P.

- Foram feitos ensaios sem vácuo para a comparação dos resultados. Para a realização de um ensaio sem vácuo, é necessário ligar o tanque da interface ar-água a pressão da atmosfera e permitir a drenagem pela base do C.P. para um adensamento somente pela ação da tensão confinante.

4. Desligar a pressão de vácuo

- Depois que a leitura de poro pressão no topo se estabilizar, desligar a pressão de vácuo do tanque da interface ar-água.
- Ligar o tanque da interface ar-água à pressão atmosférica com a instalação de um engate rápido.
- Anotar as seguintes leituras durante o tempo necessário para que a variação da poro pressão se estabilize:
    - Tempo
    - Variação volume
    - Poro pressão no topo

V. Desmontagem do ensaio

1. Fechar válvula da linha do topo e da linha 2 da base.
2. Tirar a tensão confinante.
3. Tirar água da célula triaxial.
4. Tirar o C.P. cuidadosamente para não afetar a geometria.
5. Cortar o C.P. em fatias de, aproximadamente, 1cm de comprimento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

6. Pesar cada fatia (para a medição da umidade final de cada fatia).
7. Medir o diâmetro e a altura de cada fatia.

3.2.5. Ensaios teste

3.2.5.1. Material usado para os ensaios teste

Nos ensaios teste deste ensaio foi usado o mesmo material descrito no item 3.1.5.1.

3.2.5.2. Resultados obtidos nos ensaios teste

Para o desenvolvimento dos ensaios foram feitos 25 ensaios nos quais somente os quatro últimos ensaios teste foram obtidos resultados satisfatórios. Os outros ensaios foram experiências que permitiram solucionar os problemas que se apresentaram e conhecer o comportamento dos resultados que este ensaio fornece.

Destes quatro ensaios, três foram feitos sem vácuo e um foi feito com vácuo até o tempo em que o sistema de vácuo que se tinha nesse momento permitiu. Uma vez obtidos estes resultados, o esforço da pesquisa se concentrou no desenvolvimento de um sistema de vácuo que permitisse fazer o ensaio com um tempo de duração suficiente para a poro pressão se estabilizar o que é descrito no item 3.3.

A Figura 3.39 apresenta as curvas de variação de poro pressão Vs. tempo, obtidas em ensaios sem vácuo, para corpos de prova de alturas de 2.90cm, 4.50cm e 5.90cm. A curva para o C.P. de 2.90cm de altura tem um intervalo de tempo sem leituras porque surgiu um problema com o adquisidor de dados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

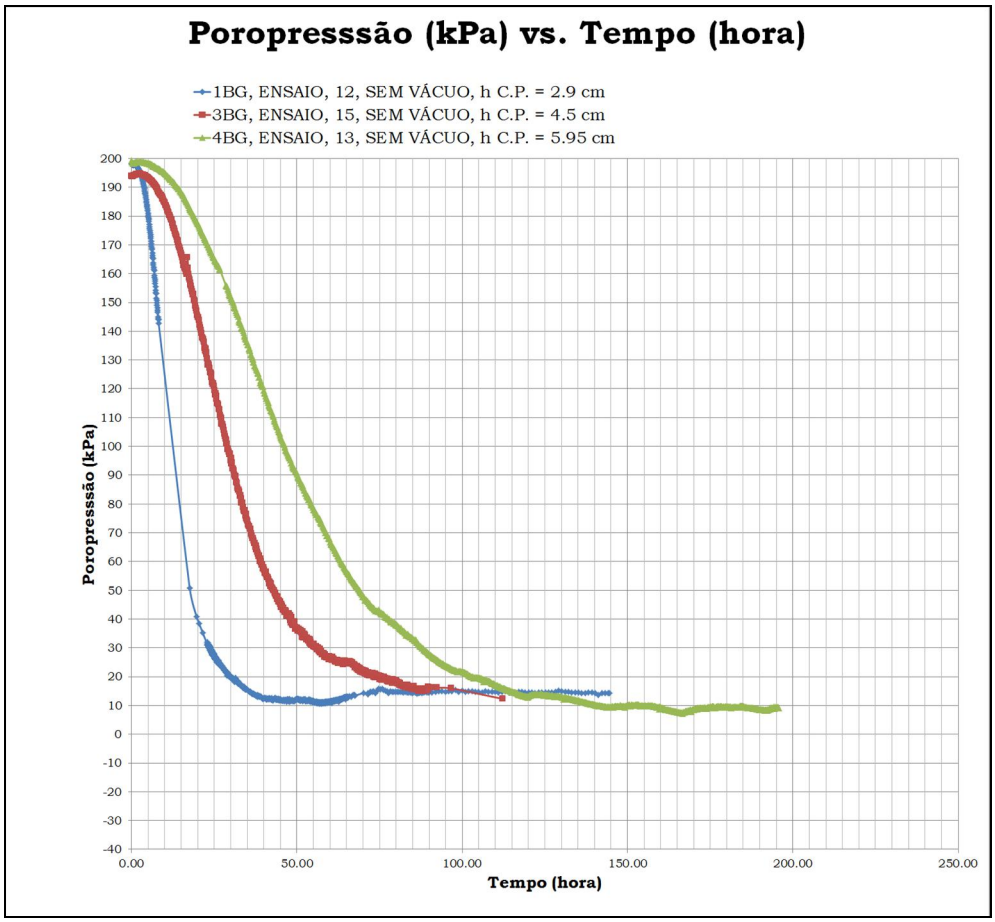


Figura 3.39 - Curvas de poro pressão Vs. tempo para corpos de prova de diferentes alturas.

A Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8 apresentam as características iniciais e finais do material para cada um dos ensaios sem vácuo para corpos de prova de alturas de 2.90cm, 4.50cm e 5.90cm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.6 - Características iniciais e finais do ensaio 1BG

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia
Titulo provisional: " Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Variação Poropressão ao Longo do Tempo

Vácuo aplicado em	SEM VÁCUO
Poropressões medidas	TOPO
Material	Argila Bahía Gauanabara - Marina da Gloria

CÓD. ENSAIO	1BG
ENSAIO	12

Caraterísticas Inicais	
Umidade	64.59%
Diametro (cm)	3.810
Altura (cm)	2.900
Volume (cm3)	33.06
Peso (g)	50.38
P. Especifico total (g/cm3)	1.524
Peso Específico dos Grãos	2.6500
Índice de Vazios Inicial	1.862
Grau de Saturação (%)	91.91%

Caraterísticas Finais	Topo	Base
Umidade	40.030%	39.610%
Diametro (cm)	3.417	3.429
Altura (cm)	1.191	1.296
Volume (cm3)	10.922	11.968
Peso (g)	19.520	21.960
P. Especifico total (g/cm3)	1.787	1.835
Peso Específico dos Grãos	2.650	2.650
Índice de Vazios final	1.076	1.016
Grau de Saturação (%)	98.564%	103.281%
Vs (mL)	5.260	5.936
Δvol (mL) por dif w	4.135	5.022

Composição Inicial	Peso (g)	Vol (cm3)
Sólidos	30.61	11.55
Água	19.77	19.77
Ar	0.00	1.74
Saturaçãao		91.91%

Variação de Volume	Δvol (mL)	%	L. inicial	L. Final
Δvol (mL) por dif w	9.16	27.70%		
Δvol (mL) por dif geo	10.17	30.77%	33.06	22.89
Δvol (mL) MVV C.P.	11.44	34.59%	134.82	123.38
Δvol (mL) MVV câmara	9.88	29.88%	2187.20	2555.00

TENSÃO CONFINANTE	200	kPa
CONTRAPRESSÃO	9	kPa

Observações:
Sistema bombeo da Tecnogeo

Data: 10-jul-12

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.7 - Características iniciais e finais do ensaio 3BG

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia
Titulo provisional: " Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Variação Poropressão ao Longo do Tempo

Vácuo aplicado em	SEM VÁCUO
Poropressões medidas	TOPO
Material	Argila Bahía Gauanabara - Marina da Gloria

CÓD. ENSAIO	3BG
ENSAIO	15

Caraterísticas Inicais	
Umidade	62.18%
Diametro (cm)	3.810
Altura (cm)	4.500
Volume (cm3)	51.30
Peso (g)	81.08
P. Especifico total (g/cm3)	1.580
Peso Específico dos Grãos	2.6500
Índice de Vazios Inicial	1.719
Grau de Saturação (%)	95.83%

Caraterísticas Finais	Topo	2	Base
Umidade	38.780%	37.740%	38.500%
Diametro (cm)	3.505	3.401	3.463
Altura (cm)	1.151	1.615	1.397
Volume (cm3)	11.106	14.672	13.158
Peso (g)	19.180	25.840	22.590
P. Especifico total (g/cm3)	1.727	1.761	1.717
Peso Específico dos Grãos	2.650	2.650	2.650
Índice de Vazios final	1.129	1.072	1.138
Grau de Saturação (%)	90.989%	93.253%	89.667%
Vs (mL)	5.215	7.079	6.155
Δvol (mL) por dif w	3.077	4.580	3.580

Composição Inicial	Peso (g)	Vol (cm3)
Sólidos	49.99	18.87
Água	31.09	31.09
Ar	0.00	1.35
Saturaçãao		95.83%

Variação de Volume	Δvol (mL)	%	L. inicial	L. Final
Δvol (mL) por dif w	11.24	21.90%		
Δvol (mL) por dif geo	12.37	24.11%	51.30	38.94
Δvol (mL) MVV C.P.	0.00	0.00%		
Δvol (mL) MVV câmara	18.66	36.37%	4190.90	4885.50

TENSÃO CONFINANTE	200	kPa
CONTRAPRESSÃO	0	kPa

Observações:
Sistema bombeo da Tecnogeo

Data: 23-ago-12

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.8 - Características iniciais e finais do ensaio 4BG

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia

Titulo provisional: " Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Variação Poropressão ao Longo do Tempo

Vácuo aplicado em	SEM VÁCUO	DRENAGEM PELA BASE	
Poropressões medidas	TOPO		
Material	Argila Bahía Gauanabara - Marina da Gloria		

CÓD. ENSAIO	4BG
ENSAIO	13

Caraterísticas Inicais	
Umidade	64.55%
Diametro (cm)	3.810
Altura (cm)	5.950
Volume (cm3)	67.84
Peso (g)	106.46
P. Especifico total (g/cm3)	1.569
Peso Específico dos Grãos	2.6500
Índice de Vazios Inicial	1.779
Grau de Saturação (%)	96.18%

Caraterísticas Finais	Topo	2	3	Base
Umidade	39.410%	38.030%	37.900%	38.810%
Diametro (cm)	3.709	3.440	3.488	3.734
Altura (cm)	1.078	1.286	1.220	1.407
Volume (cm3)	11.647	11.952	11.657	15.408
Peso (g)	19.210	21.270	20.450	26.540
P. Especifico total (g/cm3)	1.649	1.780	1.754	1.723
Peso Específico dos Grãos	2.650	2.650	2.650	2.650
Índice de Vazios final	1.240	1.055	1.083	1.135
Grau de Saturação (%)	84.228%	95.488%	92.725%	90.574%
Vs (mL)	5.200	5.815	5.596	7.215
Δvol (mL) por dif w	2.801	4.205	3.891	4.639

Composição Inicial	Peso (g)	Vol (cm3)
Sólidos	64.70	24.41
Água	41.76	41.76
Ar	0.00	1.66
Saturaçãao		96.18%

Variação de Volume	Δvol (mL)	%	L. inicial	L. Final
Δvol (mL) por dif w	15.54	22.90%		
Δvol (mL) por dif geo	17.17	25.31%	67.84	50.66
Δvol (mL) MVV C.P.	19.52	28.77%	120.15	100.64
Δvol (mL) MVV câmara	19.12	28.18%	2647.20	3358.80

TENSÃO CONFINANTE	300	kPa
CONTRAPRESSÃO	102.96	kPa

Observações:

Data 01-ago-12

A Figura 3.40, Figura 3.41 e Figura 3.42 . apresentam as curvas de porcentagem de adensamento Vs. fator tempo (U% Vs. Tv) de cada um dos ensaios comparadas com as curvas teóricas de adensamento isotrópico. Nesta comparação utilizou-se para calcular um c_v que permitisse a curva do ensaio ficar o mais similar possível com a curva teórica de adensamento isotrópico.

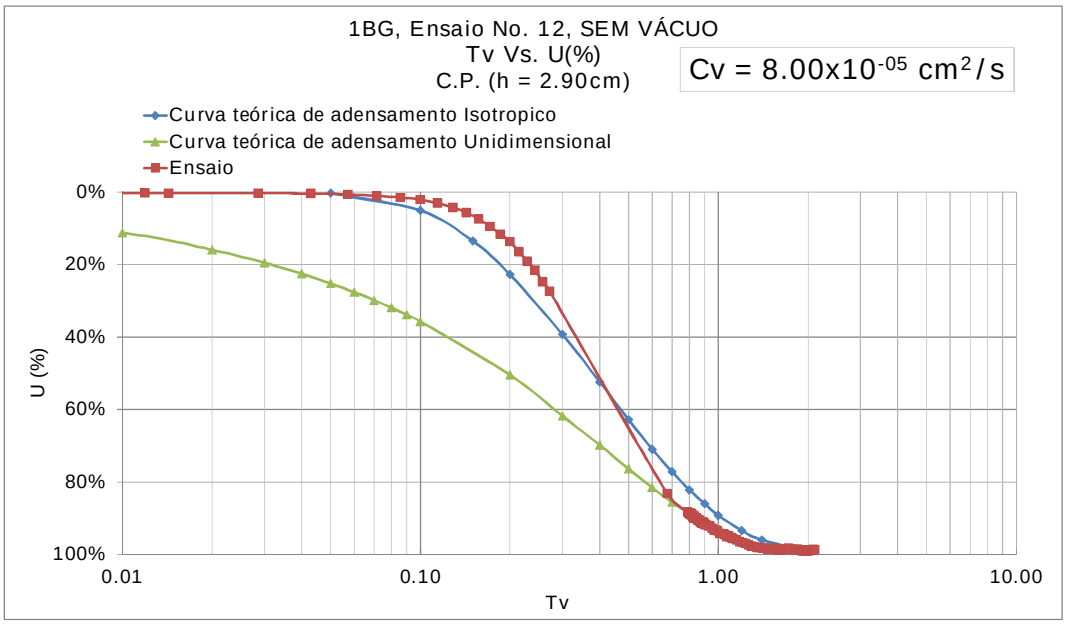


Figura 3.40 - Cálculo de coeficiente de adensamento para o ensaio 1BG, por confrontação de curva U(%) Vs. Tv do ensaio com a curva teórica de adensamento isotrópico.

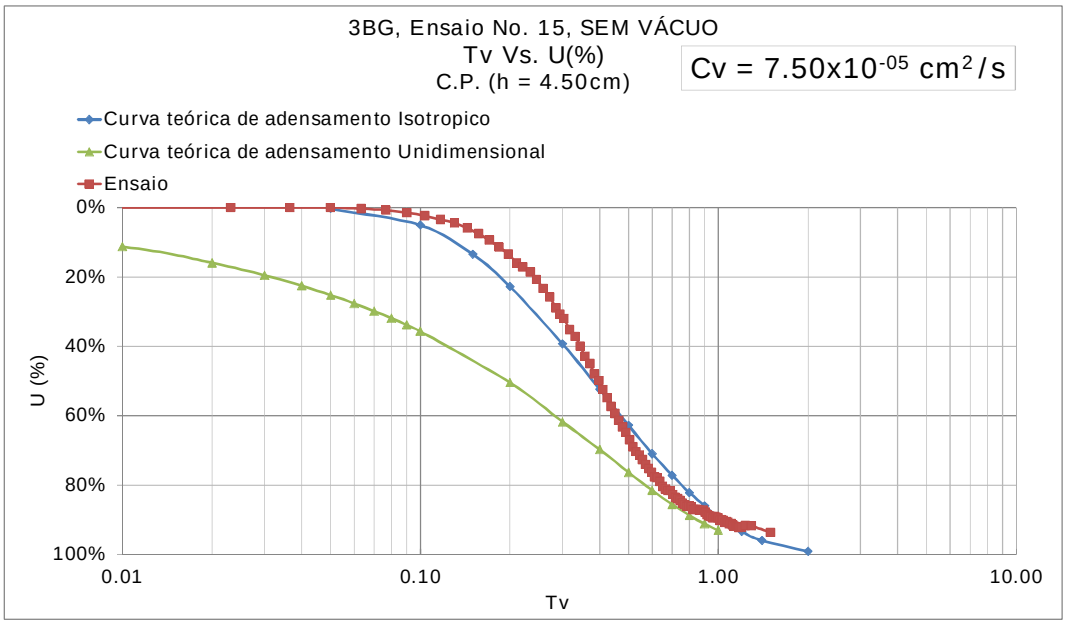


Figura 3.41 - Cálculo de coeficiente de adensamento para o ensaio 3BG.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

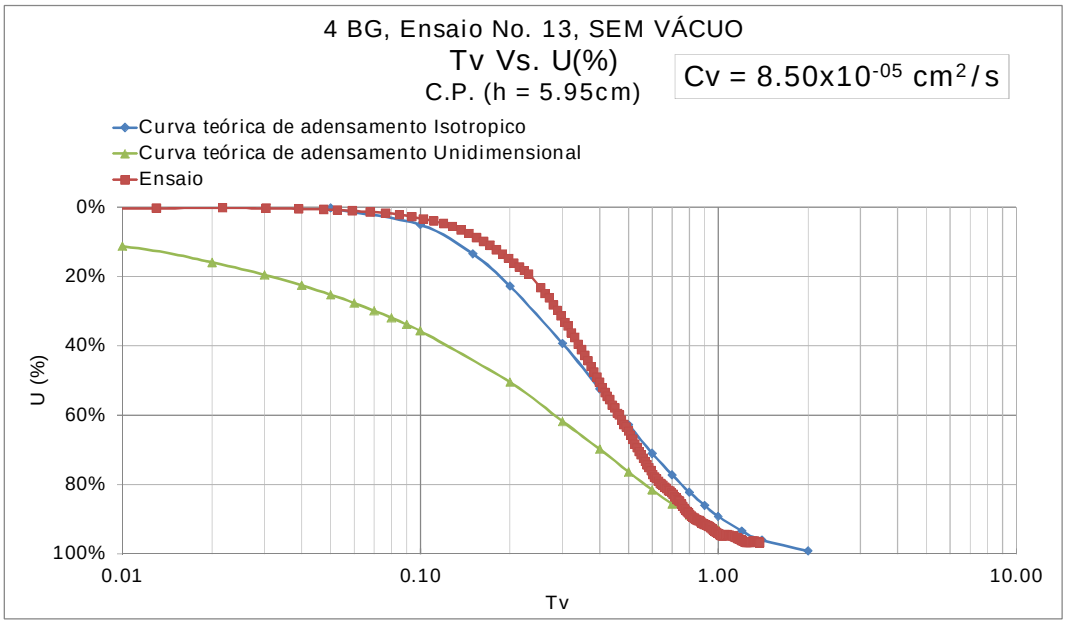


Figura 3.42 - Cálculo de coeficiente de adensamento para o ensaio 4BG.

A Figura 3.43 apresenta a curva de poro pressão Vs. tempo obtida em um ensaio com vácuo, comparada com a curva obtida em um ensaio sem vácuo com a mesma altura do corpo de prova de 2.90cm.

Este ensaio com vácuo mostra, claramente, que a poro pressão de estabilização é uma pressão negativa, mas neste ensaio não foi atingida porque ainda não se tinha a tecnologia para manter por tempos prolongados a pressão de vácuo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

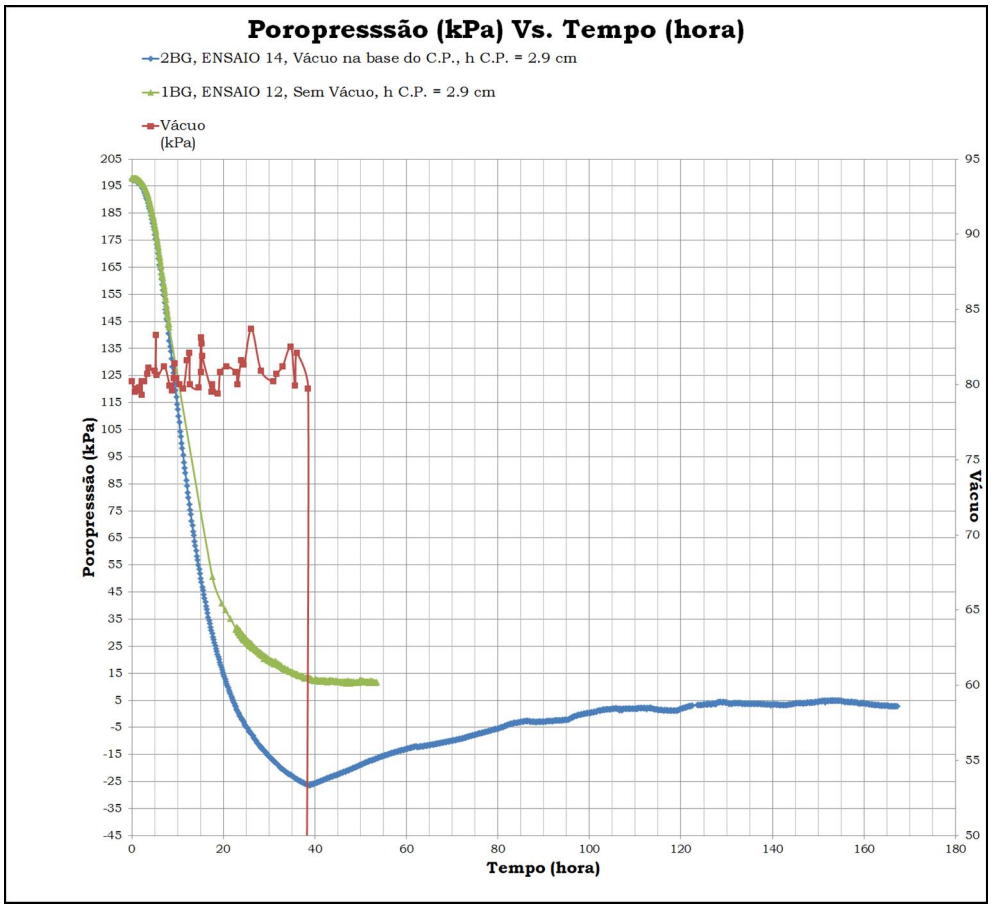


Figura 3.43 - Comparação das curvas de poro pressão Vs. tempo obtidas para C.P. de 2.90cm, em azul ensaio com vácuo e em verde ensaio sem vácuo.

A Figura 3.9 apresenta as características iniciais e finais do ensaio 2BG feito com vácuo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Tabela 3.9 - Características iniciais e finais do ensaio 2BG

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Dissertação de Mestrado em Geotecnia
Titulo provisional: " Utilização de vácuo em ensaios de laboratório para material fabricado: carregamento unidimensional e isotropico"

Variação Poropressão ao Longo do Tempo

Vácuo aplicado em	NA BASE DO C.P.
Poropressões medidas	TOPO

CÓD. ENSAIO	2BG
ENSAIO	14

Material: Argila Bahía Gauanabara - Marina da Gloria

Caraterísticas Inicais	
Umidade	64.54%
Diametro (cm)	3.810
Altura (cm)	2.900
Volume (cm3)	33.06
Peso (g)	51.67
P. Especifico total (g/cm3)	1.563
Peso Específico dos Grãos	2.6500
Índice de Vazios Inicial	1.790
Grau de Saturação (%)	95.54%

Caraterísticas Finais	Topo	Base
Umidade	38.970%	36.960%
Diametro (cm)	3.498	3.476
Altura (cm)	1.127	1.447
Volume (cm3)	10.831	13.731
Peso (g)	18.970	23.270
P. Especifico total (g/cm3)	1.752	1.695
Peso Específico dos Grãos	2.650	2.650
Índice de Vazios final	1.103	1.142
Grau de Saturação (%)	93.662%	85.787%
Vs (mL)	5.151	6.411
Δvol (mL) por dif w	3.541	4.157

Composição Inicial	Peso (g)	Vol (cm3)
Sólidos	31.40	11.85
Água	20.27	20.27
Ar	0.00	0.95
Saturaçãao		95.54%

Variação de Volume	Δvol (mL)	%	L. inicial	L. Final
Δvol (mL) por dif w	7.70	23.28%		
Δvol (mL) por dif geo	8.50	25.71%	33.06	24.56
Δvol (mL) MVV C.P.	0.00	0.00%		
Δvol (mL) MVV câmara	0.00	0.00%	0.00	0.00

TENSÃO CONFINANTE	200	kPa
CONTRAPRESSÃO	0	kPa

Observações:
Sistema bombeo da Tecnogeo

Data: 14-ago-12

A Figura 3.44 apresenta a curva U(%) Vs. Tv obtida no ensaio 2BG confrontada com a curva de adensamento isotrópico para o cálculo do coeficiente de adensamento.

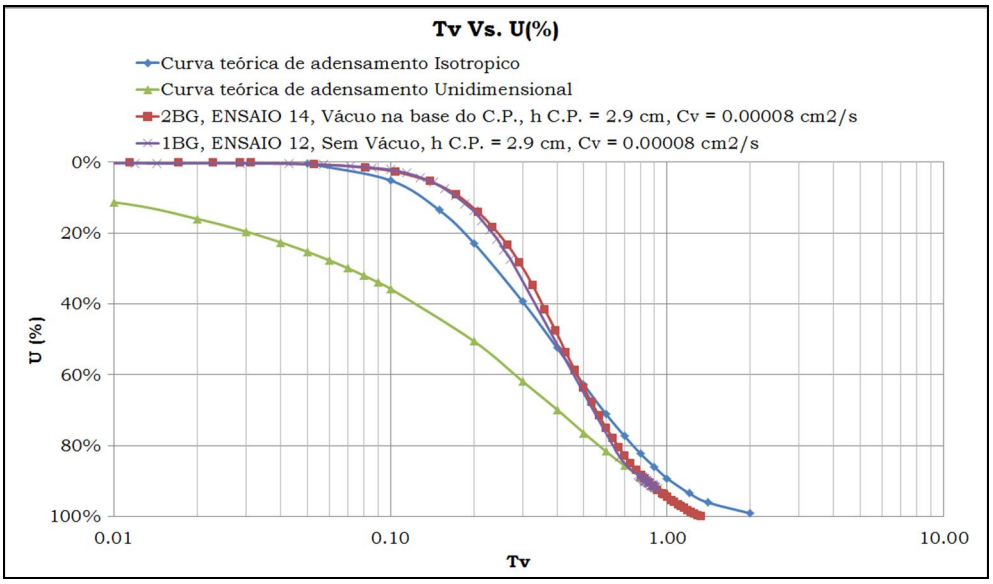


Figura 3.44 - Cálculo de coeficiente de adensamento para o ensaio 2BG e comparação com o correspondente cálculo para o ensaio 1BG.

3.3. Sistema de aplicação de vácuo

O vácuo, no campo, é aplicado em um tanque fechado que contém uma interface ar-água (água na parte inferior do tanque e ar na parte superior). Uma bomba de vácuo é ligada na parte superior (ar) assim a pressão de vácuo é transmitida à água da parte inferior. Esta parte do tanque é ligada com um sistema de tubulações a drenos verticais (dependendo da técnica usada), cravados na camada de argila mole. No laboratório foi usada uma interface ar-água em um tanque com dimensões apropriadas para a realização dos ensaios (muito menor que os tanques que são usados no campo), ver Figura 3.15 (b) e Figura 3.37.

A empresa Tecnogeo, única, no Brasil, com experiência na aplicação de vácuo em obra (até a data em que foram realizados os ensaios) doou a bomba de vácuo que foi usada para a realização dos ensaios apresentados no capítulo 4, ver Figura 3.45.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

A bomba doada pela Tecnogeo é uma bomba de vácuo de anel líquido, refrigerada com água com um motor de 1.5HP, trifásico a 220V. Esta bomba tem as mesmas características das bombas de vácuo que a Tecnogeo usa em obra. Com este tipo de bomba refrigerada à água é possível manter a pressão de vácuo durante os prolongados tempos que os ensaios precisam sem parar e mantendo a pressão constante.

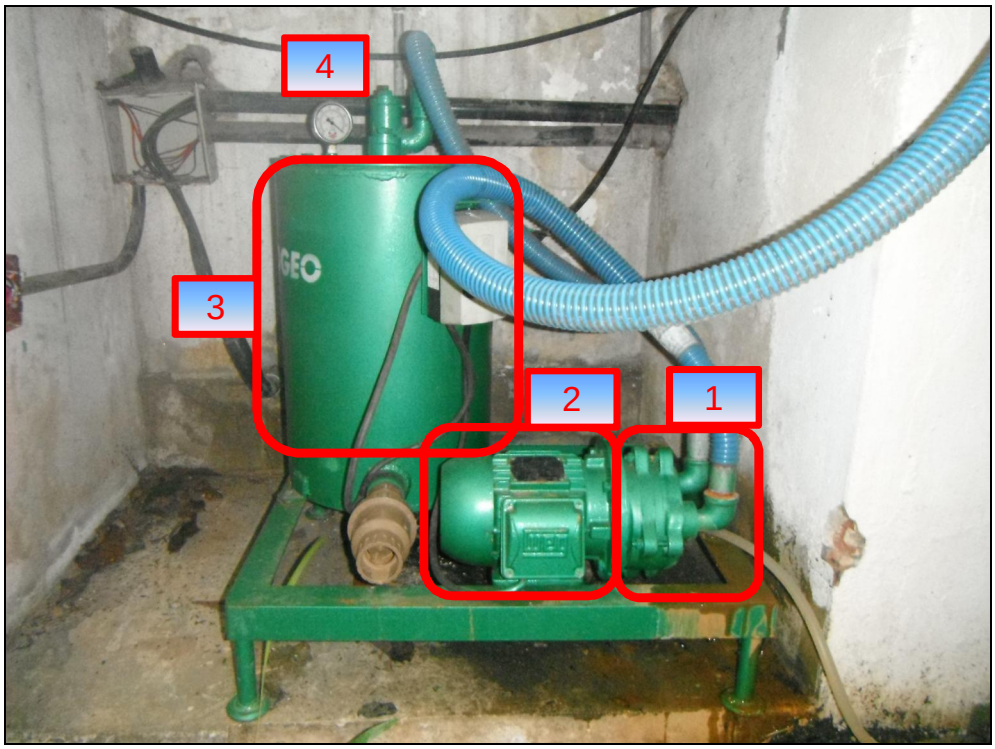


Figura 3.45 - Sistema de vácuo usado nos ensaios apresentados no capítulo 4.

1. ***Bomba de vácuo com refrigeração a vácuo***
2. ***Motor da bomba***
3. ***Tanque de armazenamento de vácuo***
4. ***Manômetro***

Esta bomba por ser refrigerada com água precisa de um fornecimento constante de água fresca (temperatura entre 15 e 35ºC). Para conseguir isso foi montado um trocador de calor. Pelas dimensões dos equipamentos para a montagem do traçador de calor foi necessário colocar todo o sistema de vácuo fora do laboratório, sendo necessária a instalação de uma tubulação para ligar o sistema (fora do laboratório) até o ponto onde foram feitos os ensaios (dentro do laboratório). Foi usada uma tubulação metálica, galvanizada de ½”.

O sistema de aplicação de pressão de vácuo deve cumprir com as seguintes condições:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

1. Manter a pressão de vácuo constante durante o tempo que demore o ensaio.
2. Trabalhar sem parar durante todo o tempo do ensaio, sem nenhum problema em seu funcionamento. Uma queda grande na pressão de vácuo pode danificar o ensaio.
3. O sistema de vácuo deve conseguir levar a pressão de vácuo desde a bomba até o ponto de aplicação (no ensaio) em um tempo que não produza atrasos na realização do ensaio.
4. O sistema deve ser hermético para impedir a entrada de ar, o que afetaria a pressão e, caso haja alguma falha no sistema por um pequeno problema, consiga manter a pressão por um tempo que permita solucionar o problema. Uma queda grande na pressão levaria à perda do ensaio.

3.3.1. Trocador de calor

Para fornecer, durante o funcionamento do sistema de vácuo, água fresca para refrigeração da bomba, foi montado um trocador de calor, o qual funciona com um freezer. Foi testado usar gelo para refrescar a água, mas o gelo tinha que ser trocado a cada duas horas, o que fazia com que o sistema se tornasse totalmente ineficiente.

Este trocador de calor, que funciona com um freezer, é capaz de manter 300lt de água a uma temperatura menor a 35ºC durante 6 horas, depois desse tempo é necessário trocar a água já aquecida por água fresca da torneira (de temperatura < 25ºC).

O trocador de calor encontra-se composto por varias peças interligadas como se mostra na Figura 3.46.

O funcionamento do trocador de calor é descrito a seguir:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

Figura 3.46 - Partes do trocador de calor.

1. *Tanque reservatório de 300 lt. de água para refrigeração da bomba*
2. *Freezer, cheio de água onde esta submergida uma condensadora (ver figura 3.46.).*
3. *Sistema de vácuo*
4. *Tanque para suspiro da água aquecida que saí da bomba.*

1. Ligar o freezer, ver Figura 3.47.

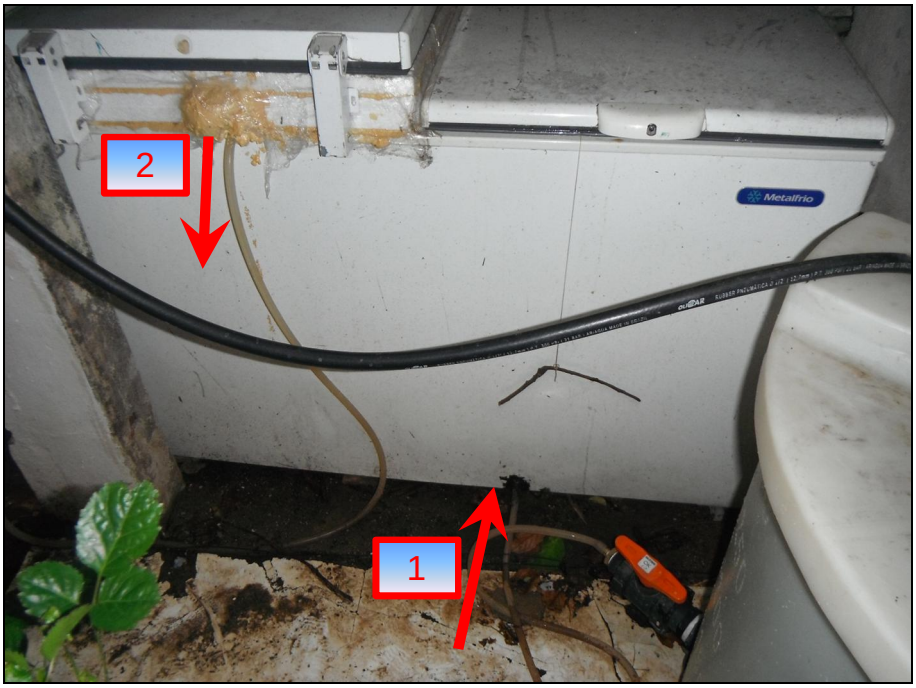


Figura 3.47 - Conexões do Freezer.

1. *Entrada de água que vem do tanque reservatório*
2. *Saída de água refrescada para a bomba*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

2. Encher com água fresca da torneira o tanque reservatório de água e o freezer.
3. Ligar a bomba.
4. Abrir bem pouco a válvula da bomba que dá contato com a atmosfera para permitir a entrada de uma mínima quantidade de ar, o que permitirá manter, por mais tempo, a água de refrigeração fresca.
5. A água sai do tanque reservatório e circula para o interior do freezer (ver Figura 3.48), passando pela condensadora (24m de tubo de cobre de diâmetro de 3/8" e de parede delgada) onde entra em contato com o frio transmitido pela água onde esta submergida, diminuindo a temperatura da água que circula no interior da condensadora.

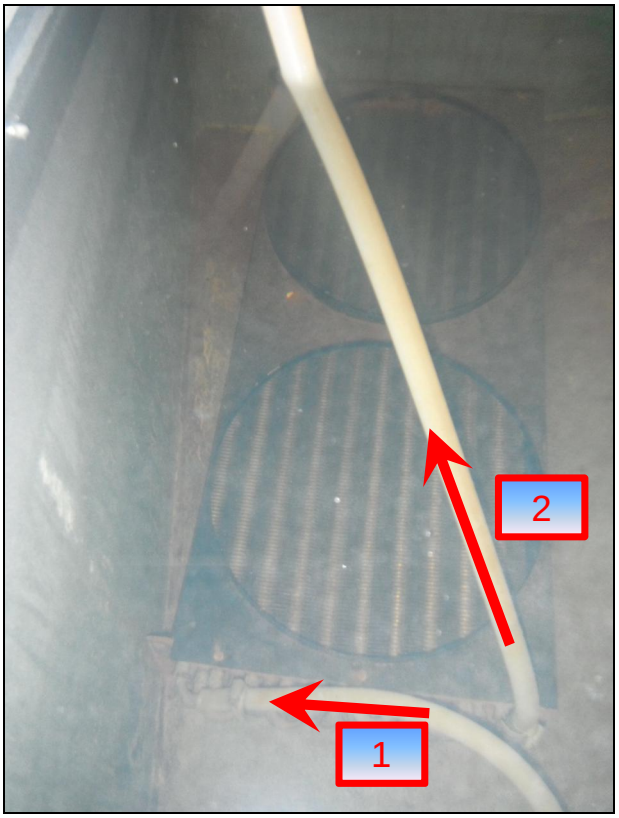


Figura 3.48 - Condensadora submergida em água dentro do freezer.
1. ***Entrada de água que vem do tanque reservatório***
2. ***Saída de água refrescada para a bomba***

A água sai do freezer e entra na bomba de vácuo onde se esquenta. A água sai da bomba em direção ao tanque para suspiro onde o ar quente, que saí junto com a água da bomba, é disperso. A água sai do tanque de suspiro novamente para o tanque reservatório, completando o ciclo de circulação.

6. Depois de seis horas é necessário trocar a água do tanque reservatório. Abrir, primeiro, a válvula na base do tanque que está um pouco acima da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA

válvula que da saída à água que vai para o freezer, para assim evitar o tanque do reservatório fique sem água para a alimentação do sistema. Depois se preenche o tanque com água fresca da torneira.

7. Repetir o passo 6 até o ensaio terminar.

Na Figura 3.49 apresenta um esquema geral do funcionamento do trocador de calor.

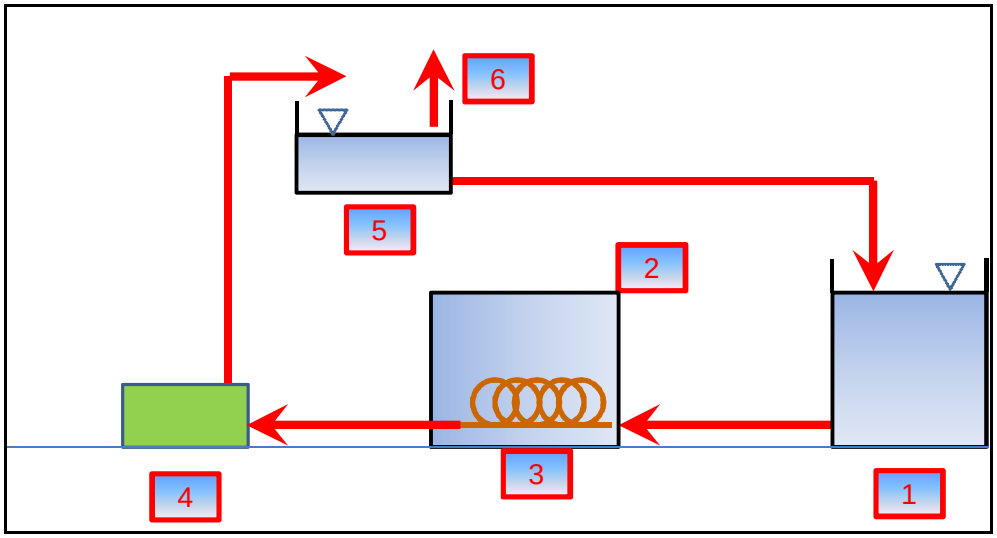


Figura 3.49 - Esquema funcionamento trocador de calor.

1. ***Tanque reservatório de 300 lt. de água para refrigeração da bomba***
2. ***Freezer, cheio de água***
3. ***Condensadora submergida na água dentro do freezer***
4. ***Bomba de vácuo***
5. ***Tanque para suspiro da água aquecida que saí da bomba.***
6. ***Ar quente sai para a atmosfera***

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0913520/CA