

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PERMEÂMETRO DE  
PAREDE FLEXÍVEL E CARGA CONSTANTE**

**CRISTINA MARTÍNEZ URIBE**

**ORIENTADOR: JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, PhD**  
**COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-271/2016**

**BRASÍLIA / DF: ABRIL / 2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PERMEÂMETRO DE  
PAREDE FLEXÍVEL E CARGA CONSTANTE**

**CRISTINA MARTÍNEZ URIBE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

**APROVADA POR:**

---

**JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, PhD (ENC/UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE DSc (ENC/UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**GILSON DE FARIAS NEVES GITIRANA JUNIOR, PhD (UFG)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE ABRIL de 2016.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MARTÍNEZ, CRISTINA URIBE

Projeto e Construção de um Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante

[Distrito Federal] 2016

xix,114 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. Permeâmetro de parede flexível | 2. Condutividade Hidráulica |
| 3. Contrapressão                  | 4. Carga Constante          |
| I. ENC/FT/UnB                     | II. Mestre                  |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARTÍNEZ, C. M. (2016). Projeto e Construção de um Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-271/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: CRISTINA MARTÍNEZ URIBE

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Projeto e Construção de um Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante.

Mestre / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Cristina Martínez Uribe  
e-mail: crismurb@yahoo.com

## DEDICATÓRIA

*A mí mamá, mi hermanita y mi tía Carmen, gracias por siempre creer en mí, por todo su apoyo y ayuda incondicional, las quiero muchísimo.*

*A Jader, porque su apoyo ha sido fundamental, gracias por motivarme y ayudarme cuando más lo necesite, sin ti no lo hubiese logrado.*

*Y a mi tío Carlos por el apoyo brindado durante todo el proceso de mi formación como profesional.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por dar-me forças para vencer os obstáculos encontrados e pelas tantas coisas boas que me concedeu.

Ao meu orientador, o professor Juan Felix pela orientação, acompanhamento durante o desenvolvimento desta pesquisa, por compartilhar seu conhecimento e estar sempre disposto a me assessorar e ajudar.

Ao meu Coorientador, o professor Luís Fernando Martins, agradeço pela constante disposição me ajudar, e por compartilhar seu conhecimento.

Ao professor Ennio Marques pelo apoio financeiro, pela ajuda em todo o processo de compra das peças do equipamento e boa vontade em ajudar. E aos professores Hernán Martínez e Gregorio Luís Silva, pela disponibilidade e interesse pela minha pesquisa.

Aos professores Edwin Garcia e Teresita Betancur, por me apoiar e motivar sempre em minha formação como profissional.

A minha família, Neccy, Carmen, Marcela, Andrés, Mary, Eline, Carlos, Dario, Gloria, Martha, Santi e Carlos Daniel, por me apoiar, me ajudar e por acreditarem em mim. Seu apoio é sempre muito importante. A vocês agradeço cada logro da minha vida.

A Jader Ruiz, por sempre acreditar em mim, por sempre me ajudar nos momentos mais difíceis, pela paciência, pelo carinho, pelas palavras e pelo silêncio, obrigada por todo.

Aos meus amigos e colegas do curso, Fredy, Amarillo, Evelin, Heydy, Jaime, Joya, Nairo, Diana, Tania, Wilber, Jose. E agradeço especialmente à Nelson, Oisy e Julian, pela sua ajuda no laboratório, e Thiago pela sua ajuda no processo de instrumentação do equipamento.

Aos técnicos do laboratório, pelo auxílio quando sempre precisei.

Ao sr. Arthur, o torneiro responsável na confecção das peças do equipamento, agradeço pela prestatividade e boa vontade em contribuir.

Ao programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade Brasília e todos os professores, por compartilhar seu conhecimento nas aulas, e ao Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo apoio financeiro.

## RESUMO

### PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL E CARGA CONSTANTE

Nesta pesquisa é apresentado o desenvolvimento, montagem e teste de um permeâmetro de parede flexível e carga constante construído. Este equipamento é uma ferramenta de qualidade que permite a determinação da permeabilidade em materiais de baixa condutividade hidráulica, o qual se compõe de uma câmara de confinamento de acrílico e sistemas de aplicação de pressão de confinamento, de aplicação de contrapressão, imposição de gradientes hidráulicos elevados e aquisição de dados automatizada. Este equipamento foi construído seguindo uma metodologia dividida em quatro etapas: i) projeto, ii) construção, iii) instrumentação e iv) operação do equipamento. Para o projeto do equipamento, objetivou-se atingir a reprodução das condições reais do campo tendo-se, assim aplicabilidade em diferentes áreas de pesquisa. Algumas considerações no projeto foram: a possibilidade de aplicação de tensão desviadora, a possibilidade de realização de ensaios em diferentes materiais e maior representatividade de materiais com frações granulares devido ao uso de amostras de maior diâmetro (130 mm). Nas etapas de construção e instrumentação do permeâmetro foi realizada toda a montagem dos componentes do equipamento, assim como o sistema de aquisição de dados. A quarta etapa envolveu a realização de ensaios pelo método de carga constante, que permitiram a validação da operação do equipamento. Para isto foram utilizadas amostras indeformadas obtidas no Campo Experimental do PPG-UnB. Os resultados obtidos da condutividade hidráulica para este tipo de material se situaram na ordem de  $2,63 \times 10^{-7}$  até  $9,01 \times 10^{-7}$  m/s, coerentes com os valores publicados na literatura para este material. O equipamento permite realizar medições de permeabilidades entre  $1 \times 10^{-4}$  e  $1 \times 10^{-12}$  m/s.

## ABSTRACT

### DESIGN AND CONSTRUCTION THE FLEXIBLE WALL PERMEAMETER AND CONSTANT HEAD

In this research, the development, assembly and test of a constant head and flexible wall permeameter which was built for the laboratory of the Postgraduate Program in Geotechnics of the University of Brasilia (PPG-UnB), is presented. This equipment is a quality tool that allows the determination of the permeability of materials with low hydraulic conductivity. The permeameter consists of a confining acrylic cell and systems for the application of confining pressure, for the application of backpressure, setting of high hydraulic gradients and automated data acquisition. This equipment was made following a methodology, developed in four stages: i) design, ii) construction, iii) instrumentation and iv) equipment's operation. For the design of the equipment, it was sought to reach the reproduction of the real ground conditions, having thus applicability in different research areas. Some of the design considerations were: the possibility of application of deviator stress, possibility to perform tests in different types of materials, a better representation of the materials with granular fractions due to the use of greater diameter samples (130 mm), among others. In the construction and instrumentation stage, all the components of the permeameter and of the data acquisition system were assembled. The fourth stage involved the performance of head constant tests that allows the validation of the operation of the equipment. For this, undisturbed soil samples obtained from the experimental field of the PPG-UnB were used. The obtained results of the hydraulic conductivity for this type of material were in the range of  $2,63 \times 10^{-5}$  to  $9,01 \times 10^{-5}$  cm/s, coherent with the values of this material published in the literature. The equipment allow to made measurement of permeability between  $1 \times 10^{-4}$  e  $1 \times 10^{-12}$  m/s

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	ESCOPO DA TESE .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	PERCOLAÇÃO DA ÁGUA .....	4
2.1.1	Lei de Darcy.....	4
2.1.2	Validade da lei de Darcy.....	6
2.1.3	Condutividade Hidráulica .....	7
2.1.4	Fatores que afetam a condutividade hidráulica.....	8
2.2	DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS FINOS	13
2.2.1	Métodos Indiretos .....	13
2.2.2	Métodos diretos.....	15
2.2.3	Permeômetros de parede rígida e de parede flexível .....	17
2.2.4	Medição da condutividade hidráulica no laboratório .....	23
2.3	TIPOS DE PERMEÂMETROS DE PAREDE FLEXIVEL DESENVOLVIDOS .....	26
2.3.1	Permeômetro de carga variável e parede flexível .....	26
2.3.2	Permeômetro triaxial para solos saturados e não saturados.....	27
2.3.3	Permeômetros de parede flexível com sistemas de controle de volume constante .....	29
2.3.4	Permeômetro de parede flexível para a determinação do coeficiente de permeabilidade de o ar e a água .....	30
2.3.5	Permeômetro de parede flexível de carga constante, fluxo constante e carga variável .....	32
2.3.6	Permeômetro de parede flexível e carga constante.....	33



2.3.7	Adaptação de um equipamento triaxial para medição da condutividade hidráulica .....	35
2.3.8	Validação de um permeâmetro de parede flexível.....	36
2.4	ABORDAGEM TEÓRICA DO ENSAIO DE CONTUTIVIDADE HIDRÁULICA .	37
2.4.1	Tensão efetiva e índice de vazios .....	38
2.4.2	Gradiente hidráulico .....	39
2.4.3	Grau de saturação.....	40
2.4.4	Contrapressão.....	41
2.5	FATORES QUE INFLUENCIAM NA MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE EM ENSAIOS DE LABORATORIO .....	42
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>44</b>
3.1	ETAPA 1: PROJETO .....	44
3.2	ETAPA 2: CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	44
3.3	ETAPA 3: INSTRUMENTAÇÃO .....	45
3.4	ETAPA 4: OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	45
3.5	MATERIAL UTILIZADO E MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA-metodologia	46
3.5.1	Moldagem da amostra de solo .....	47
<b>4</b>	<b>PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PERMEÂMETRO .....</b>	<b>50</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PERMEÂMETRO .....	50
4.2	PROJETO .....	53
4.3	CONSTRUÇÃO E DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO.....	55
4.3.1	Câmara do permeâmetro .....	57
4.3.2	Sistema de aplicação de pressão confinante .....	62
4.3.3	Sistema de aplicação da contrapressão .....	64
4.3.4	Sistema de medição das pressões e aquisição de dados.....	65
4.3.5	Aparelhagem geral .....	67
4.3.6	Especificações técnicas .....	68

<b>5</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO E OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>71</b>
5.1	PROCEDIMENTOS PRÉVIOS .....	71
5.2	SATURAÇÃO DO SISTEMA .....	72
5.3	PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	74
5.3.1	Fase 1: montagem da amostra .....	74
5.3.2	Fase 2: percolação .....	76
5.3.3	Fase 3: saturação por contrapressão .....	77
5.3.4	Fase 4: medição da condutividade hidráulica .....	79
5.3.5	Fase 5: desmontagem do ensaio .....	80
5.4	RESULTADOS .....	80
5.4.1	Fase 2: percolação .....	80
5.4.2	Fase 3: saturação por contrapressão .....	80
5.4.3	Fase 4: medição da condutividade hidráulica .....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
6.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	85
6.2	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	87
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>
	<b>APENDICE A- PRANCHAS DAS PEÇAS QUE COMPÕEM O PERMEÂMETRO ...</b>	<b>94</b>
	<b>APENDICE B- CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO.....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Condutividade hidráulica (m/s), modificado de (Craig, 2004).....	7
Tabela 2.2. Expressões para a determinação da condutividade hidráulica de solos argilosos, modificado de (Das, 2008).....	14
Tabela 2.3. Classificação de ensaio de campo segundo ABCP (2013).....	16
Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede rígida e parede flexível.....	22
Tabela 2.5. Resultados obtidos dos ensaios feitos por Olandoski (2013). ....	36
Tabela 2.6. Gradiente hidráulico máximo .....	39
Tabela 2.7. Valores do gradiente hidráulico, contrapressão e B utilizados em ensaios com permeâmetros de parede flexível. ....	40
Tabela 3.1. Características geotécnicas (Guimarães, 2002; Burgos, 2016). ....	47
Tabela 3.2. Dados iniciais da amostra de solo indeformada .....	48
Tabela 4.1. Peças necessárias para a construção do equipamento. ....	56
Tabela 4.2. Resumo especificações técnicas dos componentes do permeâmetro. ....	68
Tabela 5.1. Valores utilizados no ensaio de condutividade hidráulica na fase de saturação por contrapressão.....	81
Tabela 5.2. Resultados da condutividade hidráulica para um $i = 1,0$ . ....	82
Tabela 5.3. Resultados da condutividade hidráulica para um $i = 6,0$ . ....	83
Tabela 5.4. Resultados da condutividade hidráulica para um $i = 10,0$ . ....	83
Tabela D0.1. Leituras calibração transdutor topo-carregamento .....	109
Tabela D0.2. Leituras Calibração transdutor topo -descarregamento .....	110
Tabela D0.3. Leituras calibração transdutor base- carregamento. ....	111
Tabela D0.4. Leituras calibração transdutor base- descarregamento. ....	112
Tabela D0.5. Leituras calibração transdutor confinante- carregamento.....	113
Tabela D0.6. Calibração transdutor confinante-descarregamento. ....	114



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama esquemático do modelo experimental da lei de Darcy.....	5
Figura 2.2. Classificação esquemática do fluxo baseada no número de Reynolds (modificado de Tindall & Kunkel, 1999).....	7
Figura 2.3. Variação da condutividade hidráulico com o índice de vazios (Modificado de Lambe & Whitman, 1979).....	9
Figura 2.4. a) Efeito da compactação na estrutura interna do solo (Lambe & Whitman, 1979), b) variação da permeabilidade de argilas compactadas (Reddi, 2003). ....	11
Figura 2.5. Variação da condutividade hidráulica das argilas (Tavenas et al., 1983)..	14
Figura 2.6. Permeômetro do tipo molde de compactação (modificado de Daniel, 1994).. .....	18
Figura 2.7. Permeômetro tipo câmara de adensamento (modificado de Daniel, 1994).	19
Figura 2.8. Permeômetro tipo tubo de amostragem (modificado de Daniel, 1994). ....	19
Figura 2.9. Permeômetro tipo tubo superdimensionado (modificado de Daniel, 1994).	20
Figura 2.10. Permeômetro de parede flexível (modificado de Daniel, 1994). ....	21
Figura 2.11. Esquema do método de ensaio de carga constante (modificado de Agab, 2005).....	23
Figura 2.12. Esquema do método de ensaio de carga variável, a) carga hidráulica de entrada variável e saída constante, b) carga hidráulica de entrada e saída variáveis (modificado de Agab, 2005).....	25
Figura 2.13. Esquema do método de ensaio de fluxo constante (modificado de Chen, 1997).....	26
Figura 2.14. Diagrama esquemático do permeômetro de carga variável e parede flexível (modificado de Rodríguez, 1996).....	27
Figura 2.15. Diagrama esquemático do permeametro triaxial (modificado de Huang <i>et al.</i> , 1998).....	28
Figura 2.16. Diagrama esquemático do sistema de controle hidráulico (Dourado, 2003).....	30

Figura 2.17. Diagrama esquemático do permeâmetro (modificacao de Samingan <i>et al.</i> , 2003).....	31
Figura 2.18. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível de carga constante, fluxo constante e carga variável (modificado de Agab, 2005).....	33
Figura 2.19. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível e carga constante (modificado de Rosa, 2008). ....	34
Figura 2.20. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível do equipamento triaxial (Silveira, 2008).....	35
Figura 2.21. Diagrama esquemático do equipamento (Olandoski, 2013). ....	37
Figura 2.22. Relação entre o parâmetro B de Skempton e o Grau de saturação (Head, 1986).....	41
Figura 2.23. Valores de contrapressão para vários graus de saturação modificado de Head (1986). ....	42
Figura 2.24. Resultado de ensaios de condutividade hidráulica em geocomposto bentonítico, modificado de (Daniel et al., 1997). ....	43
Figura 5.4. (a) Localização do campo Experimental da UnB, (b) local de extração do bloco inalterado. ....	46
Figura 5.5. Procedimento de moldagem da amostra de solo indeformada.....	49
Figura 4.1. Possíveis condições de carga e fluxo. ....	52
Figura 4.2. Detalhe da câmara do permeâmetro. ....	53
Figura 4.3. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível e carga constante. ....	54
Figura 4.4. Agrupação das partes do permeâmetro de parede flexível e carga constante.. ....	55
Figura 4.5. Detalhes da a) câmara do permeâmetro, b) da tampa e c) da base. ....	58
Figura 4.6. Detalhes do cabeçote (a) e pedestal (b).....	59
Figura 4.7. a) Pedra porosa e papel filtro. b) Detalhe da pedra porosa. ....	60
Figura 4.8. Vedação da membrana com o ´rings.....	60

Figura 4.9. Prensa de carregamento. ....	61
Figura 4.10. Detalhes do pistão e a peça para engate do extensômetro no pistão.....	62
Figura 4.11. Detalhes da câmara de interface ar-água.....	63
Figura 4.12. Fornecimento de ar comprimido. ....	63
Figura 4.13. Reservatório de água deaerada.....	64
Figura 4.14. Painel de aplicação manual de pressão. ....	65
Figura 4.15. Transdutor para medição da pressão confinante. ....	65
Figura 4.16. a) Transdutor da base e topo da amostra, b) detalhe transdutor do topo..	66
Figura 4.17. Sistema de aquisição de dados. ....	67
Figura 4.18. Equipamento controlador de pressão e volume GDS. ....	67
Figura 4.19. a) Peça para compactação e moldagem de amostras, b) base para extração das amostras do tubo c) peça com acabamento biselado.....	68
Figura 5.1. Conexão realizada para a calibração dos transdutores.....	71
Figura 5.2. Marcas na pedra porosa e o geotêxtil.....	73
Figura 5.3. Modificações realizadas no cabeçote e o pedestal. ....	73
Figura 5.6. Montagem da amostra de solo na câmara do permeâmetro. ....	75
Figura 5.7. Diagrama esquemático do permeâmetro – Válvulas do sistema.....	77
Figura 5.8. Variação de B com a Contrapressão de base e topo da amostra de solo....	82
Figura 6.1. Modificação Câmara do permeâmetro.....	88
Figura D2. Calibração transdutor topo- carregamento.....	109
Figura D3. Calibração transdutor topo -descarregamento.....	110
Figura D4. Calibração transdutor base- carregamento. ....	111
Figura D5. Calibração transdutor base- descarregamento.....	112
Figura D6. Calibração transdutor confinante-carregamento. ....	113
Figura D7. Calibração transdutor confinante-descarregamento. ....	114

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A: Área transversal da amostra
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- $a_{in}$  : Área da seção transversal da entrada percolante
- $a_{out}$ : Área da seção transversal da saída do percolante
- ASTM: *American Society of Testing and Materials*
- B: Parâmetro de Skempton
- cm<sup>2</sup>: Centímetros quadrados
- $C_k$ : Índice de variação da condutividade hidráulica.
- $C_v$ : Coeficiente de adensamento
- D: Diâmetro do tubo
- DPT: Transdutor de pressão diferencial
- e: Índice de vazios
- $e_0$ : Índice de vazios inicial
- $e_l$ : Índice de vazios no limite líquido
- f: função da índice de vazios e do índice de plasticidade
- gr: Gramas
- g: Aceleração gravitacional (gravidade)
- Gs: Gravidade específica
- $h_1$ : Carga inicial no permeâmetro
- $h_2$ : Carga final no permeâmetro
- $h_A$ : Carga hidráulica na entrada do permeâmetro
- $h_B$ : Carga hidráulica na saída do permeâmetro
- Hg: Mercúrio
- i: Gradiente hidráulico
- $I_p$ : Índice de plasticidade



k: Condutividade hidráulica ou permeabilidade

$k_0$ : Condutividade hidráulica in situ para um índice de vazios  $e_0$

$k_{20}$ : Condutividade hidráulica a 20°C

K: Permeabilidade intrínseca

kgf: Quilogramas força

kN: QuiloNewton

kPa: Quilo pascais

L: comprimento da amostra

LVDT: Linear variable differential transformer

M: Massa do corpo de prova

m: Metro

$m^2$  : Metros quadrados

$m^3$  :Metros cúbicos

ml: Milímetros

ms: Milissegundos

m.s.n.m: metros sobre o nível do mar

$m_v$ : Coeficiente de compressibilidade volumétrica

n: Porosidade do solo

PVC: Policloreto de vinila

Q: Vazão de infiltração,

RA: Regulador da contrapressão na base

RB: Regulador da contrapressão no topo

Re: Número de Reynolds

$R_T$ : Razão da viscosidade do fluido entre a viscosidade do fluido a 20°C

RS: Rio Grande del Sur

$S_r$  : Grau de saturação final requerido para o solo

$S_{ro}$ : Grau de saturação inicial do solo

T: Temperatura do ensaio,

v: Velocidade de percolação

$v_c$ : Velocidade crítica

Vc1: Válvulas da pressão confinante

Vc2: Válvulas da pressão confinante

Vb1: Válvula de pressão confinante na base

Vb2: Válvula de pressão confinante na base

Vin: Volume de entrada

Vout: Volume de saída

Vpb: Válvula painel pressão na base

Vpt: Válvula painel pressão no topo

Vt1: Válvula pressão no topo

Vt2: Válvula pressão no topo

VT: Válvula do Tampão

Vs: Válvula da saída

w: Teor de umidade

$W_L$ : Limite líquido do solo

$W_P$ : Limite plástico do solo

$\Delta h$ : Diferença de carga total de entrada e saída

$\Delta t$ : Intervalo de tempo no que ocorre o fluxo  $\Delta V$

$\Delta u$ : Acréscimo da poropressão

$\Delta V$ : Quantidade de fluxo dado num intervalo de tempo

$\Delta \sigma_c$ : Acréscimo da tensão confinante

$\sigma_1$ : Tensão principal maior

$\sigma_3$ : Tensão principal menor

$\mu$ : Viscosidade do fluido

$\mu_{20}$ : Viscosidade do fluido a 20°C.

$\gamma$ : Peso específico do fluido

$\gamma_w$ : Peso específico da água

$\gamma_{sat}$  : Peso específico saturado

$\gamma_d$ : Massa específica seca máxima

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Problemas como vazamentos em reservatórios, deformações, estabilidade, recalques, rebaixamento do nível de água, entre outros, são gerados pela percolação da água no solo (Iglesias, 1997; Pinto, 2006). Devido a isso, o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo é fundamental na pesquisa de soluções aceitáveis nos problemas típicos nas áreas das Engenharia Ambiental e Civil (Nagaraj et al., 1993).

A correta determinação da permeabilidade de materiais que apresentam baixa condutividade hidráulica é necessária para o desenvolvimento de projetos de grande importância, tais como: pavimentação, aterros sanitários, lixiviação em pilhas, barragens, barreiras impermeáveis, lagoas artificiais, entre outros.

Em projetos de barragens de núcleo impermeável, são utilizados materiais de baixa permeabilidade a fim de limitar a percolação através do maciço. Por outro lado, Auvinet & Espinosa (1981) mencionam que para impermeabilização de lagoas artificiais, utilizadas como sistemas de esfriamento, são exigidas restrições rigorosas sobre a infiltração permitida nelas.

Em projetos como aterros sanitários, a determinação da condutividade hidráulica é vital, pois solos de permeabilidades muito baixas são utilizados como camadas impermeabilizantes, que tem o objetivo de criar uma barreira para minimizar o fluxo de resíduos que poderiam contaminar as camadas inferiores do solo e o lençol freático (Dos Santos, 2005). Diemer *et al.* (2008) realizaram ensaios para determinar a permeabilidade de um solo argiloso compactado misturado com fibras de polipropileno, o autor determinou que as adições de fibras contribuíram na redução da condutividade hidráulica do solo ( $10^{-12}$ m/s), tornando-o praticamente impermeável, e com potencial para sua utilização como barreira impermeável na disposição de resíduos sólidos.

Na área de pavimentação, Gao *et al.* (2014) afirma que a permeabilidade de um pavimento de asfalto é um dos parâmetros mais importantes, pois tem uma influência direta na projeção do seu tempo de vida.

Segundo Assaad & Issa, (2013), as propriedades de endurecimento do concreto submerso são afetadas pela infiltração da água que acontece nas fases de concretagem e pós-concretagem.

Para a determinação da permeabilidade de materiais de baixa condutividade hidráulica, Rodríguez (1996) projetou um permeâmetro de carga variável e parede flexível, com características que permitem, em comparação com o equipamento triaxial: menor tempo de ensaio, amplo intervalo de medição da condutividade hidráulica, maior representatividade por utilizar amostras de maior tamanho, entre outras.

Atualmente o laboratório de Pós-graduação em Geotecnia conta com dois permeômetros de parede rígida para a medição da permeabilidade, porém com estes equipamentos não é possível avaliar com precisão a saturação das amostras de solo, além de que estes permeômetros podem superestimar o valor da permeabilidade devido a existência de fluxo preferencial nas paredes laterais. Desta forma, surgiu a motivação de realizar o melhoramento do permeâmetro desenvolvido por Rodríguez (1996) e sua construção no contexto desta pesquisa.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente pesquisa tem como objetivo o melhoramento ao projeto de permeâmetro desenvolvido por Rodríguez (1996) e fornecer ao laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília uma ferramenta de qualidade, precisa e moderna para a correta determinação da permeabilidade de materiais que apresentam baixa condutividade hidráulica.

Como objetivos específicos, tem-se:

1. Construir o novo permeâmetro no laboratório do programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
2. Instrumentar o permeâmetro.
3. Realizar ensaios para validar a operação do permeâmetro.
4. Detalhar por meio de um manual as instruções de operação do permeâmetro.

### **1.3 ESCOPO DA TESE**

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, segundo a seguinte descrição:

No primeiro capítulo é apresentada a introdução ao tema desenvolvido nesta pesquisa, a descrição geral da motivação, os objetivos gerais e específicos e a estrutura da dissertação.

O capítulo dois contém a revisão bibliográfica utilizada como fundamentação teórica desta pesquisa. Nela foi feita primeiramente uma breve introdução aos conceitos fundamentais da percolação da água no solo, a lei de Darcy e sua validade, e a condutividade hidráulica com os diferentes fatores que lhe afetam. A seguir foram descritos os diferentes métodos existentes para a determinação da condutividade hidráulica e alguns permeâmetros de parede flexível desenvolvidos por diferentes autores. Finalmente foi apresentada a abordagem teórica necessária para o desenvolvimento do ensaio, junto com os fatores que influenciam a medição da permeabilidade em ensaios de laboratório.

No capítulo três apresentou-se a metodologia realizada para o desenvolvimento desta dissertação. Esta metodologia está composta por 4 etapas, que são: 1) projeto, 2) construção, 3) instrumentação, e 4) operação do equipamento. Também é apresentado neste capítulo o material utilizado para a realização desta última etapa.

No capítulo quatro é apresentado o projeto e a construção do permeâmetro de parede flexível, no qual encontra-se detalhada cada uma das partes que o compõem. No quinto capítulo encontram-se descritas as instruções para sua operação, o procedimento adotado para a realização de ensaios e os resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo seis foram apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas. No Apêndice A são apresentadas os desenhos e detalhes das peças que compõem o permeâmetro e no Apêndice B as calibrações feitas nos transdutores de pressão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica, se apresenta primeiro uma descrição dos conceitos fundamentais no estudo da permeabilidade do solo, como são: a lei de Darcy, o gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica. Depois são descritos os métodos existentes para a determinação da condutividade hidráulica em solos finos, alguns permeâmetros desenvolvidos por diferentes autores, a abordagem teórica do ensaio e finalmente os fatores que influenciam na medição da condutividade hidráulica no laboratório.

### 2.1 PERCOLAÇÃO DA ÁGUA

Com frequência a maior parte ou a totalidade dos vazios dos solos estão ocupados por água, que quando submetida a diferenças de potenciais pode fluir no interior do solo. Este fluxo de água é conhecido como percolação e se dá através dos poros interconectados, fissuras ou caminhos preferencias no solo.

A água que se movimenta entre os grãos do solo, tem uma grande influência no seu comportamento mecânico, daí sua grande intervenção em problemas geotécnicos, e a importância que tem na compreensão da verdadeira natureza dos problemas e de suas influências nas condições que controlam. Problemas gerados pela percolação no solo como, vazamentos em barragens, deformações, instabilidade, recalques e alterações físicas, químicas e biológicas, são exemplos claros da importância que tem o seu estudo (Iglesias, 1997; Pintbo, 2006).

A seguir são descritos os conceitos fundamentais para o entendimento da percolação da água no solo, como são a lei de Darcy, o gradiente hidráulico, e a condutividade hidráulica.

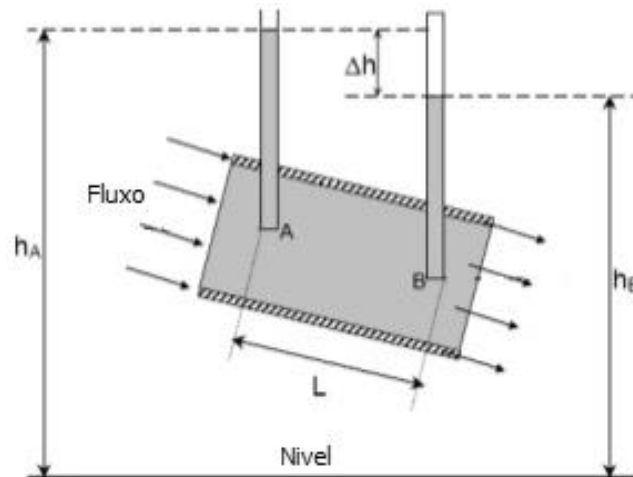
#### 2.1.1 Lei de Darcy

O fluxo da água no solo saturado é regido pela lei de Darcy, que no ano de 1856 a partir de ensaios em filtros de areia, determinou os fatores que influenciavam a vazão de água em solos saturados. Escoamento permanente, fluxo de água laminar, meio saturado e homogêneo são as hipóteses base da lei de Darcy. Na Figura 2.1 apresenta-se um diagrama esquemático do modelo experimental de Darcy.

A lei de Darcy estabelece que a vazão tem uma relação direta com a área da seção transversal ao fluxo e com a diferença de carga total de entrada e saída, também que a vazão tem uma relação inversa ao comprimento da amostra na direção do fluxo. Dessa forma e adicionando uma constante de proporcionalidade, a lei de Darcy pode-se expressar com a seguinte equação:

$$Q = -k \frac{\Delta h}{L} A \quad (2.1)$$

onde,  $Q$  é a vazão de infiltração ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Delta h$  é a diferença de carga total de entrada e saída (m),  $L$  é o comprimento da amostra (m),  $A$  é a área transversal da amostra ( $\text{m}^2$ ) e  $k$  é a constante de proporcionalidade, conhecida como a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (m/s).



**Figura 2.1. Diagrama esquemático do modelo experimental da lei de Darcy.**

O segundo termo da Equação (2.1) é o gradiente hidráulico, que é conhecido como a queda potencial entre dois pontos, dividido pela distância entre eles. Este gradiente hidráulico é um parâmetro adimensional e está definido pela seguinte equação:

$$i = \frac{h_B - h_A}{L} \quad (2.2)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.3)$$



onde,  $i$  é o gradiente hidráulico,  $h_A$  é a carga hidráulica na entrada,  $h_B$  é a carga hidráulica na saída,  $L$  é o comprimento da amostra e  $\Delta h$  é a diferença entre as cargas hidráulicas.

Levando em consideração o gradiente hidráulico, a lei de Darcy pode-se escrever como:

$$Q = kiA \quad (2.4)$$

$$v = ki \quad (2.5)$$

onde,  $v$  é a velocidade de percolação.

### 2.1.2 Validade da lei de Darcy

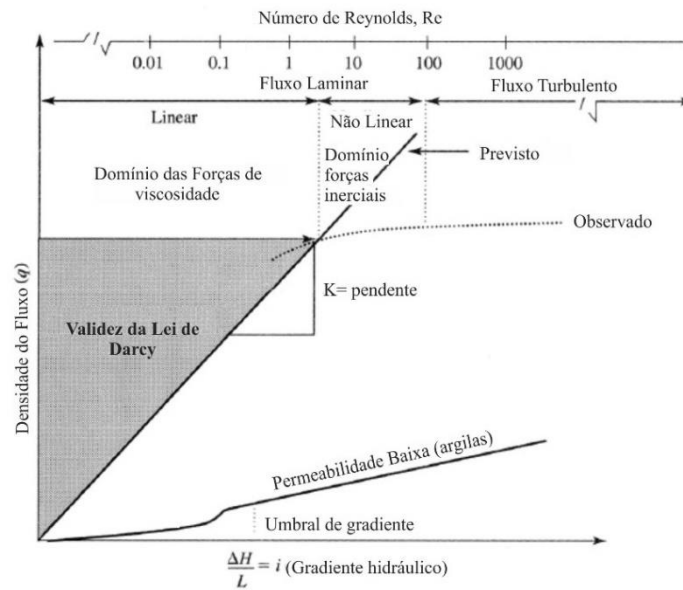
Existem dois tipos de fluxo, laminar e turbulento. No primeiro as partículas da água se movimentam de forma paralela a velocidades muito baixas, e no segundo, se movimentam de forma irregular a velocidades maiores. De acordo com as hipóteses estabelecidas pela lei de Darcy, o fluxo da água tem que ser laminar para que a lei seja válida. Fluxos laminares ocorrem a velocidades relativamente baixas.

Reynolds mostrou que a velocidade de percolação da água é uma função do gradiente hidráulico, e que existe uma velocidade crítica abaixo da qual o regime é laminar, havendo proporcionalidade entre o gradiente hidráulico e a velocidade do fluxo. Acima desta velocidade crítica, o fluxo torna-se turbulento, já que a relação não é mais linear (Figura 2.2), e portanto, a lei de Darcy não é mais válida (Head, 1994). Uma forma para garantir que o fluxo da água seja laminar, é com a aplicação do número de Reynolds, onde para condições de fluxo laminar em solos, os resultados experimentais indicaram valores de  $Re \leq 1$ , outros autores consideram um valor de  $Re < 10$  (Miyazaki, 2005; McCartney et al., 2007). O número de Reynolds pode-se determinar por meio da seguinte equação:

$$Re = \frac{v_c D \gamma}{\mu g} \quad (2.6)$$

onde,  $Re$  é o número de Reynolds (adimensional),  $v_c$  é a velocidade crítica,  $D$  o diâmetro do tubo,  $\gamma$  é o peso específico do fluido,  $\mu$  é a viscosidade do fluido, e  $g$  é a aceleração da gravidade.

De acordo com o exposto, as hipóteses da lei de Darcy são válidas para solos que tem uma granulometria fina, como siltes, argilas e areias finas (Head, 1994; Das, 2007). Portanto, em pedregulhos e em algumas areias grossas a lei de Darcy não é válida uma vez que o fluxo tende a ser turbulento.



**Figura 2.2. Classificação esquemática do fluxo baseada no número de Reynolds (modificado de Tindall & Kunkel, 1999).**

### 2.1.3 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica, também denominada como coeficiente de permeabilidade é a propriedade que tem o solo para permitir, com maior ou menor facilidade, o fluxo de água através dos seus grãos e geralmente é expressa em m/s. Esta propriedade depende dos vazios conectados no solo, onde a água pode fluir dos pontos de alta para baixa energia, e da porcentagem de finos que contém o solo (Lopez, 2012).

Esta propriedade de acordo com o tipo de solo, apresenta muita variação, tendo valores muito diferentes de um solo a outro, até 10 de ordens de magnitude (Tabela 2.1). Estas variações apresentam-se devido aos numerosos fatores que influenciam na condutividade hidráulica. Cada um destes fatores apresenta maior ou menor importância dependendo do solo e da quantidade de finos presentes nele.

**Tabela 2.1 Condutividade hidráulica (m/s), modificado de (Craig, 2004).**

	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>
Pedregulhos limpos	Areias limpas e misturas de areia e cascalho			Areias muito finas, siltes e lâminas de argila-siltosa			Argila de estrutura não fissurada e argila-siltosa (>20% de argila)				
	Argilas de estrutura desidratada e fissurada										

#### **2.1.4 Fatores que afetam a condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica depende das propriedades do solo, como: a distribuição dos grãos, sua forma e textura, a composição mineralógica, o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura e a anisotropia (Head, 1994). Além das propriedades do solo a condutividade hidráulica depende também das características do fluido, como: o peso específico e o coeficiente de viscosidade (Iglesias, 1997). Em solos argilosos fatores como a concentração iônica e a espessura das camadas de água retida em seus grãos, afetam a condutividade hidráulica (Das, 2007). Estas características têm grande influência na variação da condutividade e são descritas a seguir:

- **Distribuição dos tamanhos de grãos**

A distribuição dos grãos tem muita influência no valor da condutividade hidráulica de solos granulares. Quanto menor é o tamanho dos grãos, menor é a área dos vazios entre eles e maior é a resistência ao fluxo da água no solo (Head, 1994). De modo que a presença de grãos finos gera uma diminuição significativa da condutividade hidráulica em condições saturadas, devido à redução da dimensão dos grãos.

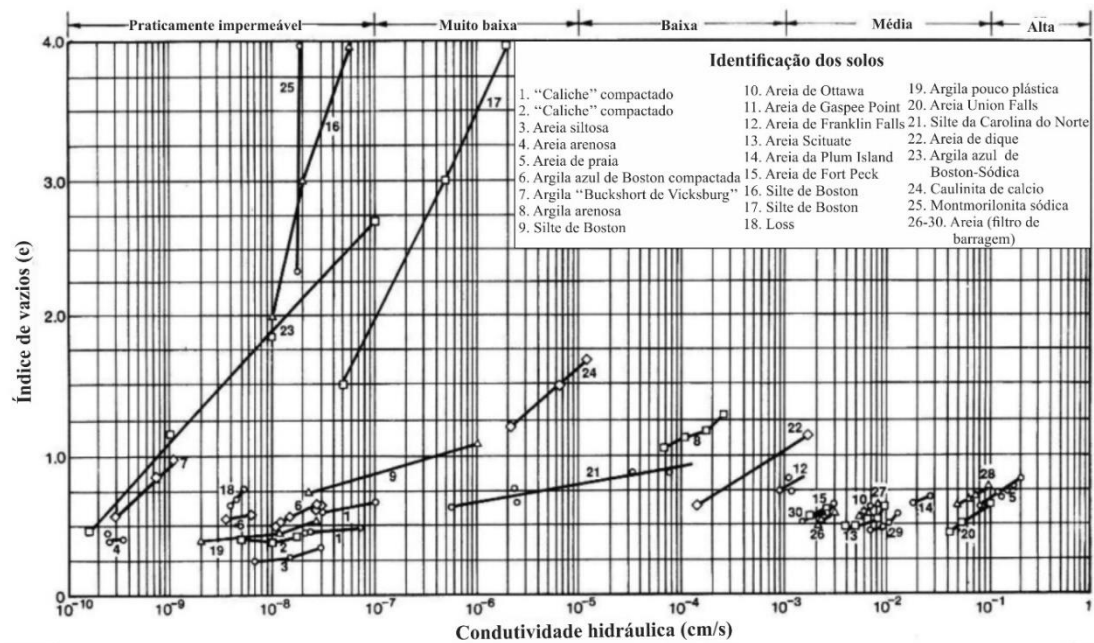
- **Forma e textura dos grãos**

A forma e textura dos grãos tem influência na condutividade hidráulica dos solos. Partículas que apresentam formas irregulares ou alongados geram caminhos mais tortuosos para o fluxo do que partículas quase esféricas. Como consequência, estes caminhos causam uma diminuição da permeabilidade do solo, da mesma forma, partículas que tem superfícies rugosas fornecem maior atrito e geram maior resistência ao fluxo do que partículas que apresentam superfícies lisas (Head, 1994).

- **Índice de vazios**

Quando um solo é compactado o volume de sólidos permanece invariável, porém o volume de vazios diminui pelo deslocamento relativo entre as partículas e em consequência, a permeabilidade do solo também diminui. Isto quer dizer que a forma em que o solo é compactado, tem um efeito considerável no tamanho e disposição dos vazios entre as partículas, assim como na condutividade hidráulica (Head, 1994). De modo que para maiores índices de vazios, maiores serão os valores da condutividade hidráulica, já que o solo permitirá com maior facilidade a percolação do fluido nele (Lukiantchuki, 2007).

Na Figura 2.3 pode-se observar a variação da condutividade hidráulica com o índice de vazios para diferentes solos ensaiados por Lambe & Whitman (1979), nela pode-se ver que quanto maior é o índice de vazios do solo, maior é sua condutividade hidráulica. Adicionalmente, os solos que apresentam menor permeabilidade tem maior variabilidade neste parâmetro com a variação do índice de vazios, apresentando uma mudança de até três ordens de magnitude em seu valor.



**Figura 2.3. Variação da condutividade hidráulica com o índice de vazios (Modificado de Lambe & Whitman, 1979).**

- **Composição mineralógica**

A condutividade hidráulica do solo depende do tipo e da quantidade de minerais, da composição da água intersticial, do tipo de cátion absorvido e da distribuição e forma dos grãos (Agab, 2005). Os solos granulares usualmente contêm os mesmos minerais da rocha matriz que foram formados por processos erosivos. Os solos finos, também podem conter os mesmos minerais, mas também contêm argilominerais produzidos pelo intemperismo químico (Verruijt, 2012).

Os minerais encontrados no solo absorvem a água localizada nele e portanto o tamanho efetivo dos poros apresenta variação (Head, 1994). Assim, e dependendo do arranjo estrutural, a maior quantidade de argilominerais no solo, menor será a condutividade hidráulica (Agab, 2005). Além disso, a superfície específica e a capacidade catiônica dos argilominerais influenciam também no valor da permeabilidade. Por exemplo, as montmorilonitas tem menor

condutividade hidráulica do que as caulinitas, devido a que suas partículas tem maior superfície específica e maior capacidade de troca catiônica (Lukiantchuki, 2007).

Portanto, em solos argilosos a composição mineralógica tem maior influência na permeabilidade do que o tamanho das partículas e tem pouca importância na permeabilidade de siltes, areias e cascalhos, a exceção da possível existência de matéria orgânica ou mica (Lambe & Whitman, 1979).

- **Grau de saturação**

O estado de saturação de um solo é muito importante em seu comportamento hidráulico, pois quanto maior for o grau de saturação maior será a condutividade hidráulica do solo (Lambe & Whitman, 1979; Alonso, 2005). Isto pode ser explicado pela existência de bolhas de ar contidas no solo que geram obstáculos ao fluxo da água e causam a diminuição de sua permeabilidade. Num solo com grau de saturação inferior ao 85%, o ar contido nele provavelmente será contínuo, em vez de bolhas de ar isoladas, isso diminui de forma considerável a permeabilidade do solo (Head, 1994) e em consequência ela será função do teor de umidade do solo (Buckingham, 1907). Estes poros de ar no solo (solo não saturado) podem ser considerados com um comportamento semelhante à fase sólida, e o solo pode ser tratado como um solo saturado que apresenta um teor de umidade reduzido (Childs, 1969), neste caso a lei de Darcy poderá ser validada no solo não saturado de um modo semelhante que para um solo saturado, no entanto o teor de umidade deve ser constante enquanto o gradiente hidráulico varia (Fredlund & Rahardjo, 1993).

- **Estrutura e anisotropia**

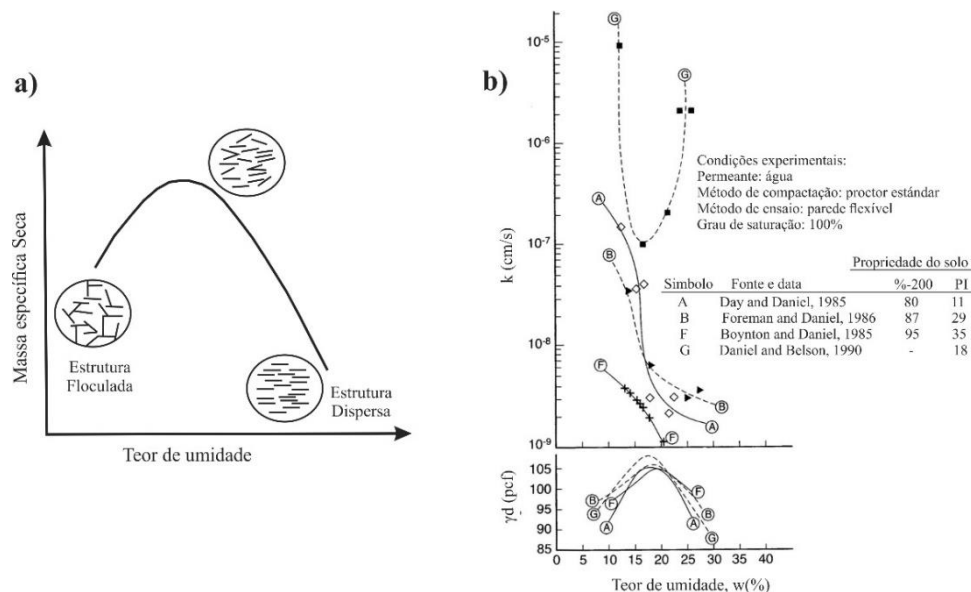
A estrutura interna é uma das características mais importantes do solo que influenciam na condutividade hidráulica, em especial dos solos finos (Lambe & Whitman, 1979). O estado de floculação ou dispersão das partículas, sua orientação e seu estado de empacotamento são características de grande importância no estudo da microestrutura dos solos argilosos que afetam a permeabilidade (Head, 1994). De acordo com Mitchel (1993), uma estrutura floculada gera uma permeabilidade maior, devido a que o arranjo das partículas apresenta canais maiores que facilitam o fluxo da água através dos grãos do solo. Por outro lado, numa estrutura dispersa, as partículas são orientadas de maneira paralela, dificultando o fluxo da água e conseqüentemente diminuindo o valor da permeabilidade

Conforme a Head (1994), muitos solos no seu estado natural são anisotrópicos e heterogêneos, na maioria das vezes devido à sua estratificação. Isso gera diferenças entre a condutividade hidráulica horizontal (paralela à estratificação) e a condutividade hidráulica vertical (normal à estratificação). Em solos sedimentares a condutividade hidráulica horizontal costuma ser maior do que a vertical (Pinto, 2006). Fatores como as discontinuidades, intrusões de silte ou areia e presença de material orgânico, afetam a condutividade hidráulica dos solos (Head, 1994).

- **Condição de compactação**

A condutividade hidráulica das argilas é função do teor de umidade e o tipo de energia de compactação utilizada. A sua complexa estrutura associada com o grau de compactação permite um amplo intervalo de valores de permeabilidade, inclusive para o mesmo teor de umidade e massa específica seca (Reddi, 2003).

Na Figura 2.4 a) pode-se observar a mudança que se gera na estrutura do solo devido à compactação e o teor de umidade de moldagem do solo. Adicionalmente, na Figura 2.4 b) pode-se ver como a permeabilidade pode variar em algumas ordens de magnitude, inclusive quando as argilas apresentam o mesmo teor de umidade e massa específica seca máxima. Isto pode ocorrer devido a microestrutura das argilas compactadas que depende de fatores, como o tipo de mineral, tipo de energia de compactação, teor de umidade e massa específica seca (Reddi, 2003).



**Figura 2.4. a) Efeito da compactação na estrutura interna do solo (Lambe & Whitman, 1979), b) variação da permeabilidade de argilas compactadas (Reddi, 2003).**

- **Natureza do fluido**

A viscosidade dinâmica e o peso específico são propriedades do fluido que tem maior relevância enquanto a influência sobre a condutividade hidráulica do solo. A viscosidade dinâmica gera resistência ao movimento do fluido e depende da temperatura, de modo que quanto maior for a temperatura, menor será o valor de viscosidade dinâmica e, maior será o valor da condutividade hidráulica.

Daí que a condutividade hidráulica, não só dependerá das propriedades do meio, mas também do tipo de fluido que percola por ele. Levando tudo isso em consideração, a lei de Darcy pode ser expressa da seguinte forma (Daniel, 1994):

$$Q = K \frac{\gamma}{\mu} i A \quad (2.7)$$

onde,  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ ),  $K$  é a permeabilidade intrínseca ( $m^2$ ),  $\gamma$  é o peso específico fluido ( $kN/m^3$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $kN.s/m^2$ ),  $i$  é o gradiente hidráulico e  $A$  é a área do permeâmetro ( $m^2$ ).

O parâmetro  $K$  na Equação(2.7) é a permeabilidade intrínseca, o qual é uma propriedade que só depende do meio poroso. É importante notar que nesta equação o parâmetro  $K$  é diferente da condutividade hidráulica  $k$  (Equação (2.4)).

- **Temperatura**

Como as propriedades do fluido dependem da temperatura, a condutividade hidráulica também dependerá da temperatura (Head, 1994; Das, 2007). Em amostras com permeabilidades baixas, flutuações de temperatura apresentam uma das maiores dificuldades, isto devido à expansão e contração da água no sistema, que pode exceder o volume percolado da água na amostra. Portanto, adotou-se o coeficiente referido à água a uma temperatura de 20°C, para fazer a correção de temperatura utilizando a seguinte equação:

$$k_{20} = k \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (1)$$

Onde,  $k_{20}$  é a condutividade hidráulica a 20°C,  $k$  é a condutividade hidráulica na temperatura  $T(^{\circ}C)$  de ensaio,  $\mu$  é a viscosidade do fluido na temperatura  $T$  de ensaio e  $\mu_{20}$  é a viscosidade do fluido a 20°C.

A norma ASTM D5084-10 (2010) define uma função para a razão  $\frac{\mu}{\mu_{20}}$ , num intervalo de temperatura entre 5 a 50°C, dada pela seguinte equação:

$$R_T = \frac{2,2902 (0,9842^T)}{T^{0,1702}} \quad (2.8)$$

onde,  $\frac{\mu}{\mu_{20}}$  é a razão RT.

## **2.2 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS FINOS**

Em vista dos diversos fatores que influenciam no valor da condutividade hidráulica, esta é uma das propriedades do solo que apresenta maior variabilidade. Por causa disso, uma ligeira alteração provocada na forma de sua medição ou no equipamento, poderá causar mudanças no seu valor (Agab, 2005). Esta propriedade pode ser determinada de forma indireta, com o ensaio de adensamento ou com relações empíricas, e de forma direta com ensaios de campo ou laboratório. A seguir são descritos brevemente os métodos empregados para a determinação da condutividade hidráulica.

### **2.2.1 Métodos Indiretos**

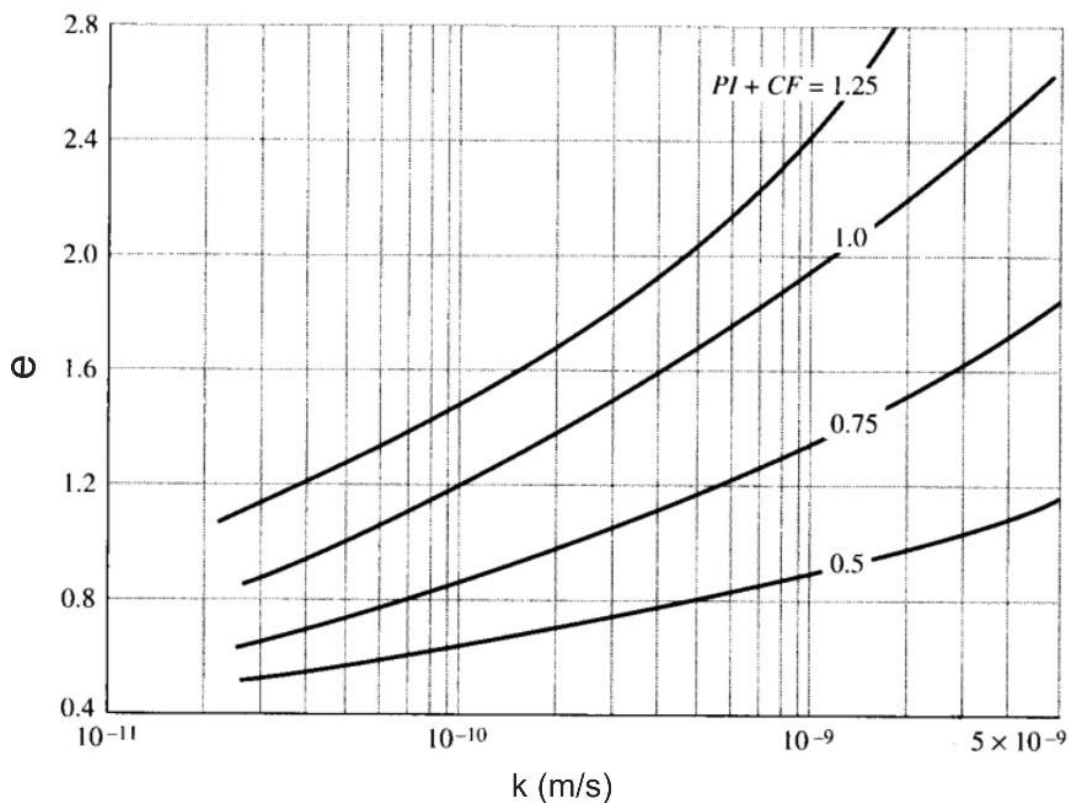
#### **2.2.1.1 Relações empíricas**

As relações empíricas expostas por distintos autores (Taylor, 1948; Mesri & Olson, 1971; Samarasinghe et al., 1982) levam em consideração o índice de vazios do solo para calcular o valor da condutividade hidráulica, sem necessidade de fazer ensaios de laboratório ou em campo. É recomendável que estas relações empíricas sejam empregadas como guia geral para todas as considerações práticas, entretanto, se leve em consideração que estas relações existem apenas para estimativa, porque a magnitude de  $k$  é altamente variável e dependente de múltiplos fatores (item 2.1.4). Na Tabela 2.2 apresentam-se as relações expostas por diversos autores.



**Tabela 2.2. Expressões para a determinação da condutividade hidráulica de solos argilosos, modificado de (Das, 2008).**

Autor	Relação Empírica	Considerações
Taylor (1948)	$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad C_k = \frac{e_0}{2}$ <p>k= condutividade hidráulica para um índice de vazios;  <math>k_0</math>=condutividade hidráulica <i>in situ</i> para um índice de vazios <math>e_0</math>;  <math>C_k</math>= índice de variação da condutividade hidráulica.</p>	Para $e < 2,5$
Mesri & Olson (1971)	$\log k = A' \log e + B'$ <p>A e B são constantes empíricas.</p>	
Samarasinghe <i>et al.</i> , (1982)	$k = C \left( \frac{e^n}{1 + e} \right)$ <p>e = índice de vazios;  C e n são constantes determinadas de forma experimental.</p>	Argila normalmente adensada
Raju <i>et al.</i> (1995)	$\frac{e}{e_L} = 2,23 + 0,204 \log k$ <p>k em cm/s;  <math>e_L</math> índice de vazios no limite liquido</p>	Argila normalmente adensada
Tavenas <i>et al.</i> (1983)	$k = f$ <p>f= função do índice de vazios e de PI+CF  PI é o índice de plasticidade (em decimais), e CF é a fração de argila (em decimais). Ver Figura 2.5</p>	



**Figura 2.5. Variação da condutividade hidráulica das argilas (Tavenas et al., 1983).**

### 2.2.1.2 Ensaio de Laboratório

A condutividade hidráulica pode ser determinada de forma indireta ou direta a partir do ensaio de adensamento unidimensional. Na primeira, o ensaio de adensamento é feito e a condutividade é determinada com os parâmetros adquiridos do ensaio. O valor da condutividade hidráulica obtido desta forma é subestimado, por consequência do adensamento secundário gerado na amostra. A condutividade determina-se com a seguinte expressão:

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (2.9)$$

Onde,  $C_v$  é o coeficiente de adensamento ( $m^2/s$ ),  $m_v$  é o coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $1/kPa$ ),  $\gamma_w$  é o peso específico da água ( $kN/m^3$ ).

Do ponto de vista de Sarsby (2000), não é recomendável a determinação da condutividade hidráulica por meio do ensaio de adensamento, isto porque o valor obtido tem uma grande dependência ou sensibilidade a pequenas variações na magnitude relativa dos parâmetros envolvidos na equação, os quais podem ter mudanças significativas de acordo com a estrutura do solo.

A segunda forma para determinar a condutividade hidráulica é realizando o ensaio de permeabilidade de forma direta na amostra sem gerar adensamento, porém podem-se apresentar problemas de fluxo entre o contato solo-anel, e gera-se uma sobre estimativa da condutividade hidráulica (Berthila, 2005).

## 2.2.2 Métodos diretos

Os valores da condutividade hidráulica determinados com ensaios de laboratório ou de campo, apresentam maior representatividade no seu valor do que os valores obtidos pelos métodos indiretos. Ao fazer uma comparação entre os ensaios de campo e laboratório, pode-se dizer que os primeiros, tem como vantagem a representatividade dos resultados, em quanto ao efeito de escala. Por outro lado, os ensaios de laboratório tem as possibilidades de controlar na amostra o grau de saturação, o gradiente hidráulico e o sentido do fluxo, além de ter um custo menor do que os ensaios de campo (Agab, 2005).

### 2.2.2.1 Ensaio de Campo

Na prática, os ensaios de condutividade em campo geralmente são classificados de acordo com método de prospecção, porém do ponto de vista hidrogeotécnico, podem ser

classificados com base em sua forma de realização e pressão aplicada (ABCP, 2013). Uma classificação dos ensaios realizados em campo foi proposta pelo manual de ensaios da ABCP (1992). Esta classificação, apresentada na Tabela 2.3, é feita de acordo a sua forma de realização e pressão aplicada.

**Tabela 2.3. Classificação de ensaio de campo segundo ABCP (2013).**

Maneira de realização	Pressão aplicada	Denominação do ensaio	Método de prospecção
Nível Constante	Carga	Infiltração	Sondagens, poços e cavas
	Descarga	Bombeamento	Poços e sondagens
Nível variável	Carga	Rebaixamento	Poços e sondagens
	Descarga	Recuperação	Poços e sondagens

Como descrito por ABCP (2013), o nível constante é mantido pela introdução de água (ensaios de infiltração) ou pela retirada de água (ensaios de bombeamento), assim para o primeiro caso, a carga constante é aplicada e é medida a vazão injetada necessária para manter a carga constante. Para o segundo caso, é medida a vazão bombeada necessária para manter constante o nível de água rebaixado. Nos ensaios a nível variável, o nível inicial da água é alterado e a tendência do nível de água de voltar a sua posição inicial é medida. Nos ensaios de rebaixamento é realizada introdução de água e é medida a velocidade de rebaixamento. Nos ensaios de recuperação, pelo contrário ao de rebaixamento, depois da retirada de água é medida a velocidade de recuperação.

Alguns dos ensaios mais comuns para medição em campo da condutividade hidráulica são: ensaio de Nasberg , ensaio USBR E-19, Lefranc-Mandel, permeâmetro de Boutwell (solos argilosos compactados), permeâmetro de Guelph e sondas porosas (carga constante ou variável) como o dispositivo BAT (Rodríguez, 1996; Santos, 2004).

### **2.2.2.2 Ensaios de laboratório**

Os ensaios para a determinação da condutividade hidráulica são divididos em dois tipos, de acordo com equipamento utilizado. Estes equipamentos, chamados de permeômetros, podem ser, dependendo de suas características, de duas classes: i) permeômetros de parede rígida e ii) permeômetros de parede flexível. A escolha do equipamento depende das condições de contorno a serem adotadas, como o tipo de material, condições de pressão e fluido percolante

(Dourado, 2003). Os ensaios realizados nestes equipamentos podem ser feitos por três métodos diferentes, os quais variam de acordo à velocidade de infiltração empregada em carga constante, carga variável e fluxo constante.

No itens 2.2.3 e 2.2.4 serão descritos com maiores detalhes os permeômetros de parede rígida e parede flexível e os métodos empregados para a determinação da condutividade hidráulica.

### **2.2.3 Permeômetros de parede rígida e de parede flexível**

Como foi mencionado acima, no laboratório pode-se medir a condutividade hidráulica com permeômetros de parede rígida ou flexível. Pode-se utilizar qualquer um para a medição de baixas condutividades hidráulicas e seu uso vai depender das condições do ensaio e do tempo disponível. Os permeômetros de parede flexível são mais utilizados para solos compactados, e os permeômetros de parede rígida para ensaios em solos granulares (Berthila, 2005).

#### **2.2.3.1 Permeômetro de parede rígida**

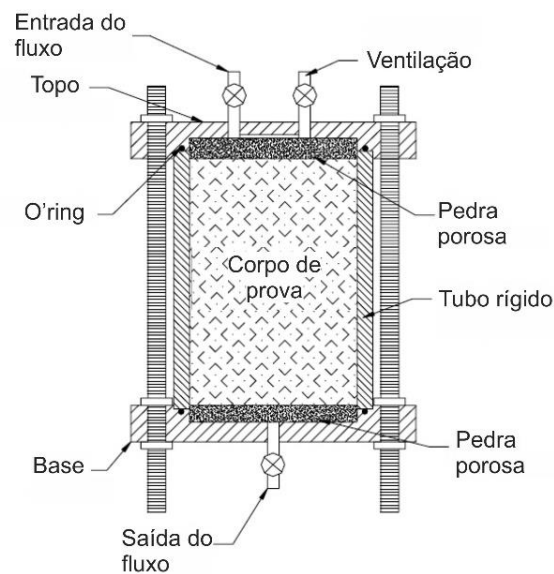
Este tipo de permeômetro tem um tubo rígido ou caixa que contém a amostra de solo que vai ser ensaiada. O tubo geralmente é circular e construído de metal, acrílico ou vidro e é fixado nas extremidades inferior e superior, por chapas conectadas através de parafusos (Agab, 2005; Farnezi, 2006). Este permeômetro é simples em sua construção e operação, o custo de sua fabricação é baixo e pode ser construído de grande tamanho, de acordo as necessidades (Daniel, 1994).

Segundo Daniel (1994) e Caberlon, (2004), este permeômetro tem como desvantagem a impossibilidade de verificação da saturação da amostra, a impossibilidade de saturação por contrapressão, a inexistência de controle sobre as pressões atuantes (com exceção do permeômetro tipo câmara de adensamento) e a existência de fluxo lateral entre as paredes da câmara e a amostra de solo. Nesta última desvantagem, gera-se uma superestimação da condutividade hidráulica, mas isso tem maior representatividade em solos com baixa permeabilidade, nos quais a maior quantidade de macroporos, apresenta-se junto às paredes do permeômetro, onde dificulta-se uma correta compactação (Berthila, 2005).

Existem quatro tipos de permeômetros: molde de compactação, câmara de adensamento, tubo amostrador e tubo superdimensionado.

##### **a) Permeômetro tipo molde de compactação**

Este tipo de permeâmetro é o mais comum nos permeâmetros de parede rígida e tem como vantagens sua simplicidade e baixo custo, mas a falta de controle sobre o estado de tensões, o risco de fugas laterais e a não saturação da amostra são as grandes desvantagens que apresenta (Daniel et al., 1985; Agab, 2005). Neste permeâmetro, a amostra de solo é posicionada no molde (Figura 2.6), e compactada de acordo com as necessidades do ensaio. São utilizadas duas pedras porosas, no topo e base da amostra para garantir que o fluxo unidirecional seja dentro do corpo de prova (Daniel, 1994; Berthila, 2005). Solos granulares e finos podem ser ensaiados neste tipo de equipamento.

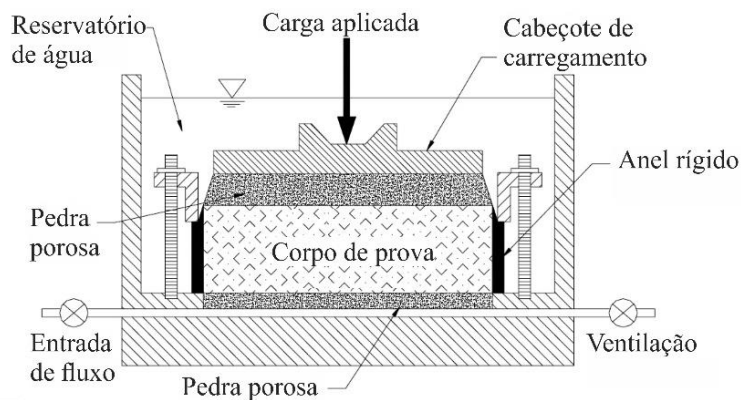


**Figura 2.6. Permeâmetro do tipo molde de compactação (modificado de Daniel, 1994).**

#### **b) Permeâmetro tipo câmara de adensamento**

Neste permeâmetro um pistão é posicionado acima do solo para a aplicação da tensão de adensamento na amostra (Figura 2.7), e como foi mencionado acima, com este permeâmetro pode-se medir a condutividade hidráulica de forma indireta e direta (item 2.2.1), onde para o primeiro caso, a condutividade é subestimada, e para o segundo é sobrestimada.

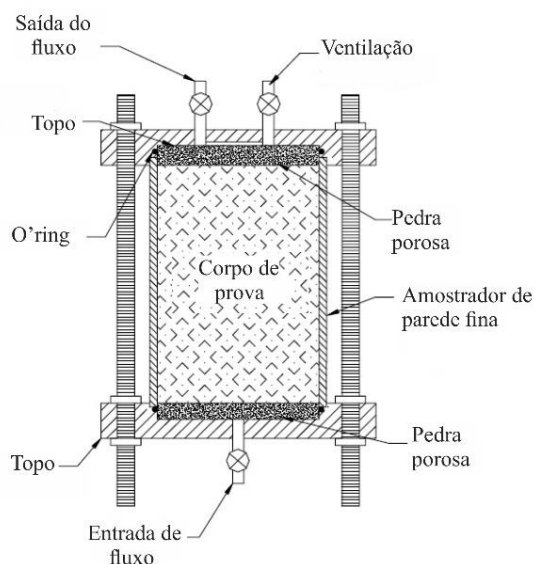
Nestes permeâmetros podem ser aplicadas pressões verticais, fazer medições das deformações verticais e ensaiar amostras indeformadas ou compactadas. Existe a possibilidade de exercer fluxo ascendente pela amostra que ajuda na saturação. No entanto apresenta-se a possibilidade de vazamento na parede lateral, dificuldade de moldagem sem perturbações para alguns amostras de solo, custo maior do que o molde de compactação e desconhecimento das tensões horizontais na amostra (Shackelford, 1994).



**Figura 2.7. Permeâmetro tipo câmara de adensamento (modificado de Daniel, 1994).**

### c) Permeâmetro tipo tubo de amostragem

Estes permeâmetros são construídos a partir de tubos de amostragem, como o tubo Shelby. Neles o solo fica inalterado e é permeado diretamente no tubo (Figura 2.8), porém, apesar das paredes do tubo serem finas, neste tipo de permeâmetro o solo pode sofrer deformações pela ação de cisalhamento durante a amostragem. Além disso, no caso de ter solos rígidos ou solos com presença de materiais grossos, apresenta-se fluxo entre a parede do tubo e o solo (Daniel, 1994; Berthila, 2005). Daniel (1994) não recomenda este tipo de permeâmetro a menos que estes problemas sejam evitados.



**Figura 2.8. Permeâmetro tipo tubo de amostragem (modificado de Daniel, 1994).**

#### d) Permeâmetro tipo tubo superdimensionado

Neste permeâmetro utiliza-se um material de selamento, geralmente bentonita, entre a amostra de solo e o permeâmetro (Figura 2.9). Este equipamento foi utilizado por Daniel (1994) para ensaiar solo-cimento com resultados satisfatórios, porém devido à dificuldade na realização e controle do selamento durante o do ensaio, o autor não recomenda sua utilização.

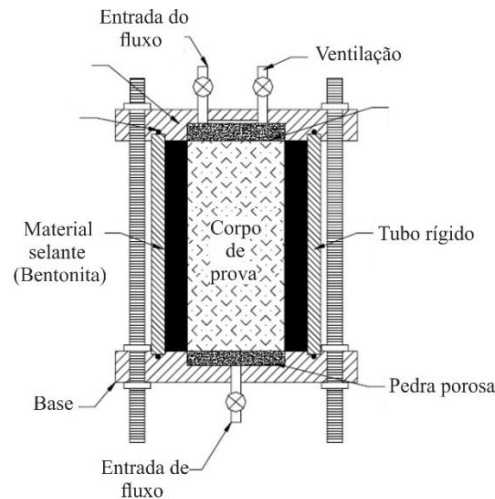


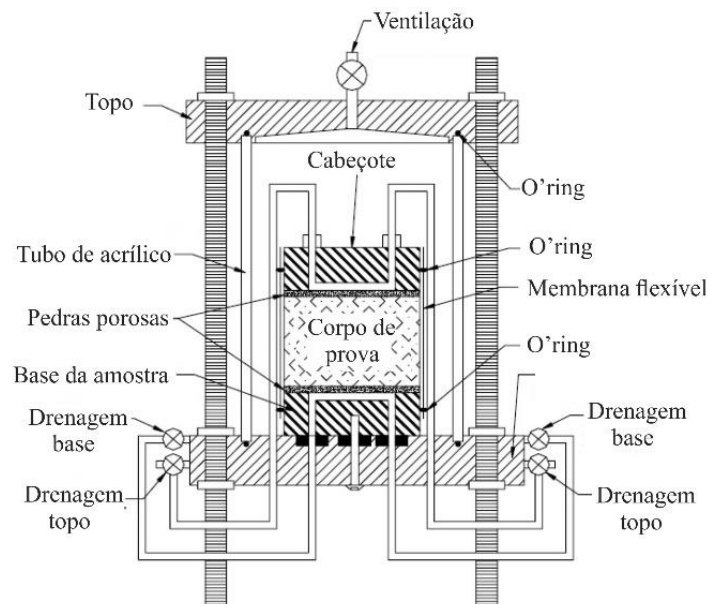
Figura 2.9. Permeâmetro tipo tubo superdimensionado (modificado de Daniel, 1994).

#### 2.2.3.2 Permeâmetro de parede flexível

Este tipo de permeâmetro utiliza câmaras triaxiais convencionais ou modificadas, nas quais a amostra é posicionada em seu interior e confinada por duas pedras porosas e por uma membrana de látex em torno dela (Figura 2.10). A câmara é pressurizada para conseguir a união entre a membrana e o corpo de prova (Berthila, 2005), de modo que a flexibilidade que apresenta a membrana, faz que ela se adapte às irregularidades da amostra e se ajuste as mudanças nas dimensões do solo e, conseqüentemente, os vazamentos entre a parede e a amostra sejam prevenidos (Agab, 2005).

Estes permeâmetros permitem o controle do estado de tensões no solo, e similar aos ensaios triaxiais, a saturação da amostra é realizada por contrapressão. Nos permeâmetros de parede flexível podem ser ensaiadas amostras indeformadas, reconstituídas, remoldadas e compactadas, que tenham condutividade hidráulica não maior a  $1 \times 10^{-6}$  m/s (D5084-10-ASTM, 2010). Nestes equipamentos podem ser utilizados fluidos com produtos químicos ou resíduos, porém se deve levar em conta a compatibilidade entre o fluido e a parede do permeâmetro, e entre o fluido e a membrana de látex, além da difusão do fluido permeante ou solutos no fluido, através da membrana e o fluido dentro da câmara (Daniel, 1994).

Do ponto de vista do Agab (2005), os permeâmetros de parede flexível são os mais apropriados para amostras com superfície irregular, e ideal para solos que serão submetidos a pressões de sobrecarga substancial. Algumas das vantagens que apresenta este permeâmetro em comparação com o permeâmetro de parede rígida, é a saturação da amostra por contrapressão e o controle e monitoramento das tensões verticais e horizontais (Caberlon, 2004). Daniel (1994) afirma que o permeâmetro de parede flexível é o melhor tipo de permeâmetro para utilizar em quase todas as situações.



**Figura 2.10. Permeâmetro de parede flexível (modificado de Daniel, 1994).**

Um maior detalhamento deste tipo de permeâmetro será realizado nos itens 2.3 e 2.4. No primeiro são descritos vários permeâmetros de parede flexível desenvolvidos por diversos autores, e no segundo é descrita toda a abordagem teórica necessária para fazer ensaios nestes equipamentos.

### **2.2.3.3 Comparação entre o permeâmetro de parede rígida e parede flexível**

A maior diferença entre o permeâmetro de parede rígida e parede flexível é sua forma de confinar e saturar a amostra de solo na determinação da condutividade hidráulica (Agab, 2005). Cada um destes permeâmetros apresenta diversas características que de acordo as necessidades, podem se converter em vantagens ou desvantagens na determinação da condutividade. Na Tabela 2.4 são apresentadas as vantagens e as desvantagens entre estes permeâmetros segundo Daniel (1994), Shackelford (1994) e Berthila (2005).



**Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede rígida e parede flexível**

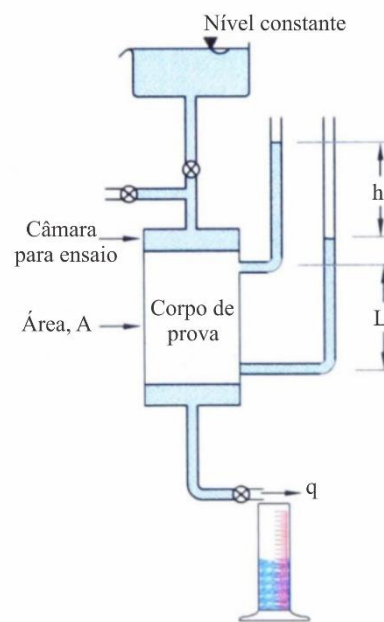
Permeâmetro		Vantagens	Desvantagens
Parede Rígida	Tipo molde de compactação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidade em sua construção e operação.</li> <li>• Custo de fabricação baixo.</li> <li>• Podem ser construídos permeâmetros de grandes dimensões.</li> <li>• Útil para amostras compactadas</li> <li>• Se podem utilizar diversos materiais, inclusive materiais resistentes a químicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade na saturação da amostra e a impossibilidade de sua verificação.</li> <li>• Impossibilidade de saturação por contrapressão.</li> <li>• Tempo de ensaio longo em materiais com baixa condutividade hidráulica.</li> <li>• Variações no volume ou deformações não podem ser medidas ou controladas.</li> <li>• Vazamentos entre as paredes da câmara e a amostra de solo, e consequentemente sobrestimação da condutividade hidráulica.</li> <li>• Não há controle sobre tensões horizontais.</li> <li>• Retração e fissuramento da amostra podem não ser detectados.</li> <li>• Tensões na amostra são desconhecidas e não podem ser controladas.</li> <li>• Não é útil para amostras indeformadas.</li> <li>• Incompatibilidade com produtos químicos ou poluentes.</li> </ul>
	Tipo câmara de adensamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressões verticais de campo podem ser simuladas.</li> <li>• Deformações verticais podem ser medidas.</li> <li>• O intervalo de tensões verticais pode ser ensaiado nas amostras.</li> <li>• Útil para amostras compactadas ou indeformadas.</li> <li>• Tempo de ensaio curto com amostras pequenas.</li> <li>• Fluxo ascendente que ajuda na saturação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amostras pequenas podem não ser representativas.</li> <li>• Potenciais vazamentos nas paredes laterais e consequentemente superestimação da condutividade hidráulica.</li> <li>• Algumas amostras podem ser difíceis de moldar no anel de adensamento, gerando perturbações.</li> <li>• Alto custo comparado com o permeâmetro tipo molde de compactação.</li> <li>• Retração e fissuramento da amostra podem não ser detectados.</li> <li>• Tensões horizontais na amostra são desconhecidas (ko é desconhecido).</li> <li>• Saturação por contrapressão não é possível.</li> <li>• Incompatibilidade com produtos químicos ou poluentes.</li> </ul>
Parede Flexível		<ul style="list-style-type: none"> <li>• A amostra pode ser saturada utilizando contrapressão.</li> <li>• A saturação pode ser confirmada com o parâmetro B de Skempton.</li> <li>• As superfícies irregulares das amostras de solo podem ser acomodadas com facilidade.</li> <li>• Fluxos laterais podem ser prevenidos ou minimizados</li> <li>• As tensões na amostra podem ser controladas.</li> <li>• Variações no volume ou deformações podem ser medidas.</li> <li>• Útil para amostras compactadas e indeformadas.</li> <li>• Tempo de ensaio rápido em materiais com baixa condutividade hidráulica, devido a utilização da contrapressão para sua saturação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incompatibilidade da membrana com produtos químicos ou poluentes.</li> <li>• Os químicos do permeante podem difundir-se a través da membrana.</li> <li>• Retração e fissuramento da amostra podem não ser detectados.</li> <li>• A utilização de gradientes muito grandes pode resultar na utilização de tensões efetivas não razoáveis na amostra.</li> <li>• Alto custo comparado com os permeâmetros de parede rígida.</li> <li>• Operação do equipamento mais complexa.</li> </ul>

## 2.2.4 Medição da condutividade hidráulica no laboratório

Para a medição da condutividade hidráulica no laboratório podem-se utilizar três métodos diferentes, os quais variam de acordo com a velocidade de infiltração empregada. Estes métodos podem ser de carga constante, carga variável e fluxo constante e sua utilização dependerá das necessidades desejadas.

### 2.2.4.1 Carga constante

No ensaio de carga constante circula-se água pela amostra para medir o volume de água percolado num tempo dado. Neste método de ensaio, o gradiente hidráulico deve permanecer constante, mantendo a mesma altura do nível da água, ou mantendo invariável a pressão da água na entrada e saída da amostra, durante todo o tempo de ensaio (Dourado, 2003). Na Figura 2.11 pode-se observar o esquema deste método.



**Figura 2.11.** Esquema do método de ensaio de carga constante (modificado de Agab, 2005).

Conhecendo a quantidade de água que percola na amostra num intervalo de tempo dado, a perda de carga, a área e o comprimento da amostra; calcula-se a condutividade hidráulica com a seguinte equação, fundamentada na lei de Darcy:

$$k = \frac{\Delta V \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t} \quad (2.10)$$

onde,  $k$  é a condutividade hidráulica (m/s),  $\Delta V$  é a quantidade de fluxo dado num intervalo de tempo, tomando como meia o fluxo de entrada e saída (m<sup>3</sup>),  $L$  é o comprimento da amostra (m),  $A$  área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>),  $\Delta h$  e perda de carga através da amostra-permeâmetro num  $t_1$  (m de água), e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s) no qual ocorre o fluxo  $\Delta V$ .

As principais vantagens deste método, são a facilidade de realização do ensaio, simplicidade nos cálculos, e a possibilidade de manter constante a pressão na amostra que evita a sua variação volumétrica (Caberlon, 2004; Dos Santos, 2005).

Quando são utilizados permeâmetros de parede rígida, este método de ensaio só pode ser aplicado em materiais granulares que apresentam valores altos de permeabilidade,  $k \geq 10^{-5}$  m/s (D5084-10-ASTM, 2010). Isto porque erros são gerados pela evaporação da água que ocorre durante os tempos de ensaio que costumam ser elevados.

#### 2.2.4.2 Carga variável

O método de carga variável é utilizado somente em solos que apresentam baixa condutividade hidráulica, como siltes e argilas. Nele, a perda de carga (gradiente hidráulico) decresce com o tempo, e é medida a quantidade de água que atravessa a amostra devido às diferenças de níveis (Badillo & Rodríguez, 1969; Santos, 2004). Este método é utilizado apenas em solos com baixa condutividade hidráulica, e pode ser realizado com carga de entrada variável e saída constante, ou com carga de entrada e saída variáveis (D5084-10-ASTM, 2010). O esquema do método é apresentado na Figura 2.12.

As equações que atendem as duas maneiras de realizar o ensaio de carga variável são:

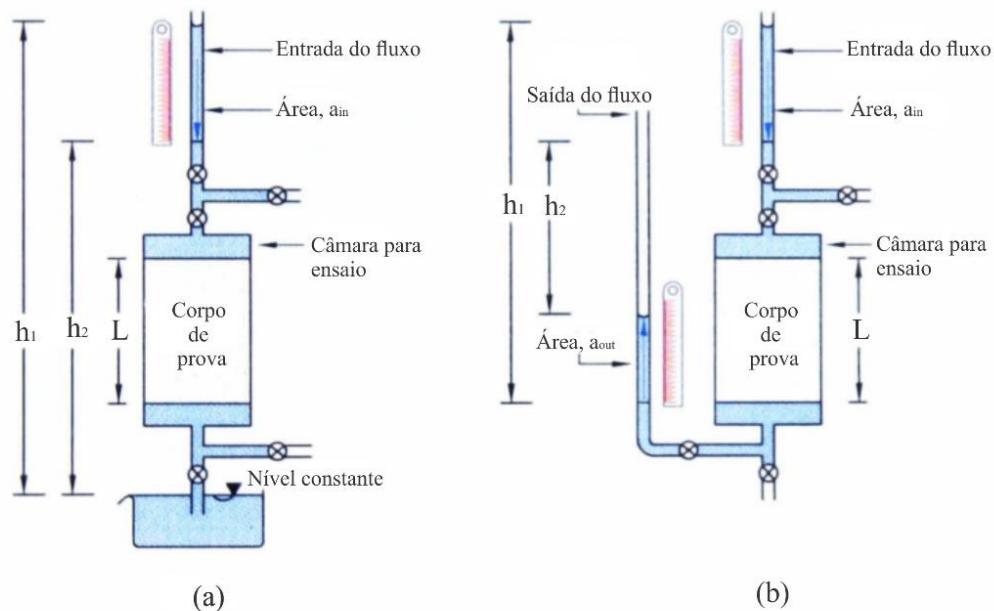
$$k = \frac{aL}{A \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.11)$$

$$k = \frac{a_{in} a_{out} L}{(a_{in} + a_{out}) A \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.12)$$

onde, a Equação (2.11) corresponde ao método de carga variável na entrada e constante na saída, e a Equação (2.12) ao método de carga variável na entrada e saída.

Nestas equações,  $k$  é a condutividade hidráulica (m/s),  $a$  é a área da seção transversal do dispositivo de medição de cargas (m<sup>2</sup>),  $L$  é o comprimento da amostra (m),  $A$  área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>),  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s) no que ocorre o fluxo,  $h_1$  e  $h_2$  são a

carga hidráulica inicial e final respetivamente,  $a_{in}$  e  $a_{out}$  são as áreas da seção transversal da entrada e saída do percolante.

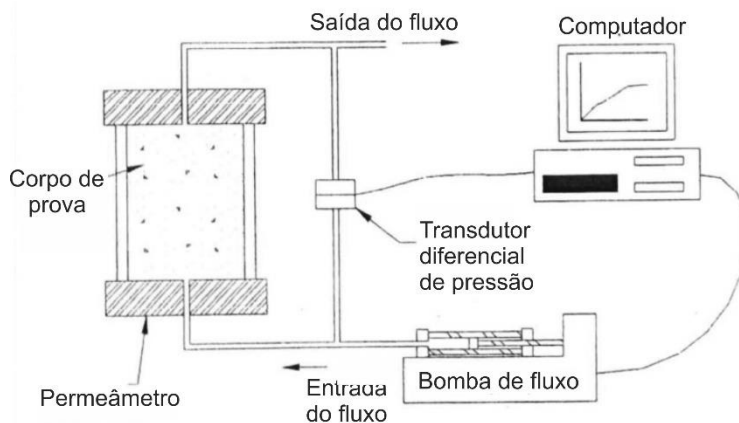


**Figura 2.12. Esquema do método de ensaio de carga variável, a) carga hidráulica de entrada variável e saída constante, b) carga hidráulica de entrada e saída variáveis (modificado de Agab, 2005)**

### 2.2.4.3 Fluxo constante

Neste método (Figura 2.13), a velocidade de fluxo se mantém constante e é medida a perda de carga. O controle da velocidade do fluxo é feito por bombeamento (vazão sobre controle) e a medição da diferença de pressão é feita através de um transdutor. Quando as pressões diferenciais serão constantes na amostra, e quando a entrada e a saída do fluxo estão equilibrado, o ensaio pode-se dar por concluído (Botelho, 2001; Agab, 2005).

Segundo Agab (2005), o método apresenta vantagens como a medição da condutividade hidráulica em períodos de tempo mais curtos e em gradientes hidráulicos menores, e que o ensaio pode ser automatizado com controle por computador das pressões e vazões.



**Figura 2.13. Esquema do método de ensaio de fluxo constante (modificado de Chen, 1997)**

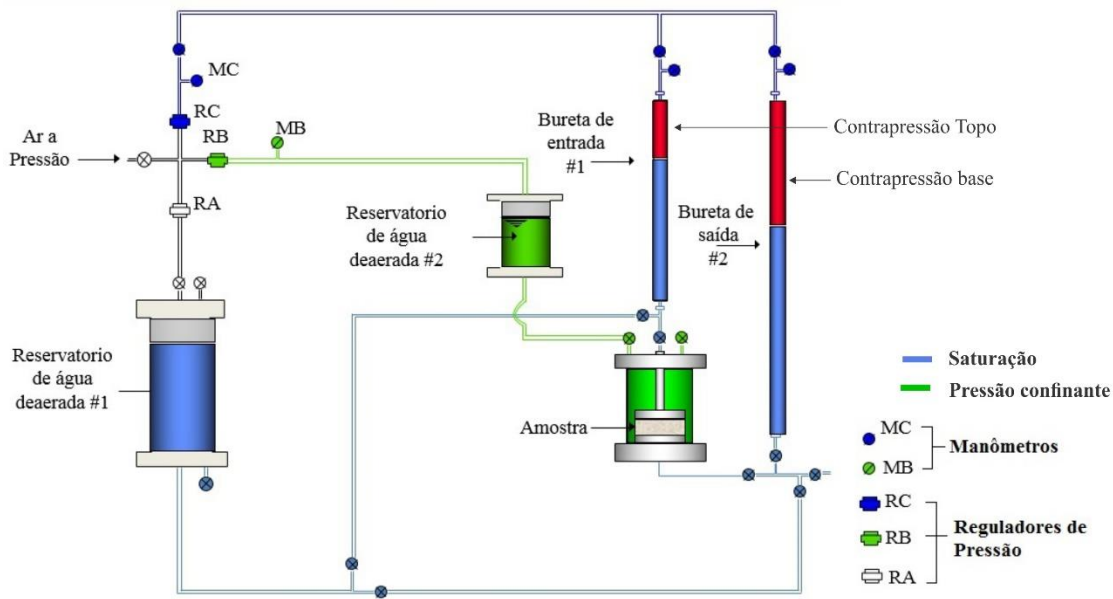
## **2.3 TIPOS DE PERMEÂMETROS DE PAREDE FLEXIVEL DESENVOLVIDOS**

Diversos autores tem construído permeâmetros de parede flexível para a determinação da condutividade hidráulica de solos (Rodríguez, 1996; Huang et al., 1998; Dourado, 2003; Samingan et al., 2003; Agab, 2005; Rosa, 2008; Silveira, 2008; Olandoski, 2013). Cada um destes equipamentos foi desenvolvido de acordo com as necessidades de cada pesquisa, adaptando-lhe aos diversos requerimentos. A seguir são descritos alguns permeâmetros de parede flexível, onde se apresenta primeiramente uma descrição do equipamento, as amostras utilizadas no ensaio, condutividades hidráulicas obtidas, as conclusões do equipamento e um diagrama esquemático do permeâmetro para maior entendimento do seu funcionamento.

### **2.3.1 Permeâmetro de carga variável e parede flexível**

Rodríguez (1996) fez um permeâmetro de parede flexível e carga variável para determinar a condutividade hidráulica em materiais característicos de uma lagoa de evaporação, ele fez também ensaios de campo e comparou os resultados obtidos.

O permeâmetro é composto por câmara, base e cabeçote de aço inoxidável (intercambiáveis), dois reservatórios, sistema de válvulas, reguladores de pressão e manômetros, além de duas buretas, de entrada e saída de água. O permeâmetro apresenta compatibilidade entre o permeante e seus componentes. O equipamento desenvolvido pelo autor conta com um sistema de saturação, um sistema de aplicação de contrapressão e de pressão confinante (Figura 2.14).



**Figura 2.14. Diagrama esquemático do permeâmetro de carga variável e parede flexível (modificado de Rodríguez, 1996).**

Rodríguez (1996) fez ensaios em amostras de solo com altura de 5,5 cm e diâmetro de 13 cm, empregou seis amostras com diferentes tipos de solos (argila, silte e areia), e utilizou como fluido água e salmoura. Os valores de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios encontraram-se entre  $2,3 \times 10^{-5}$  e  $3,06 \times 10^{-8}$  m/s. O autor também fez ensaio de campo e obteve um valor médio de  $1,55 \times 10^{-7}$  m/s.

O autor menciona como vantagens do permeâmetro, em comparação com o equipamento triaxial: i) redução do tempo de ensaio devido à altura da amostra, ii) maior representatividade nos valores da condutividade hidráulica obtidos devido ao diâmetro da amostra, iii) possibilidade de aplicar gradientes de até 20, e iv) eliminação da oxidação das peças, quando é utilizado nos ensaios com fluidos diferentes da água (salmoura).

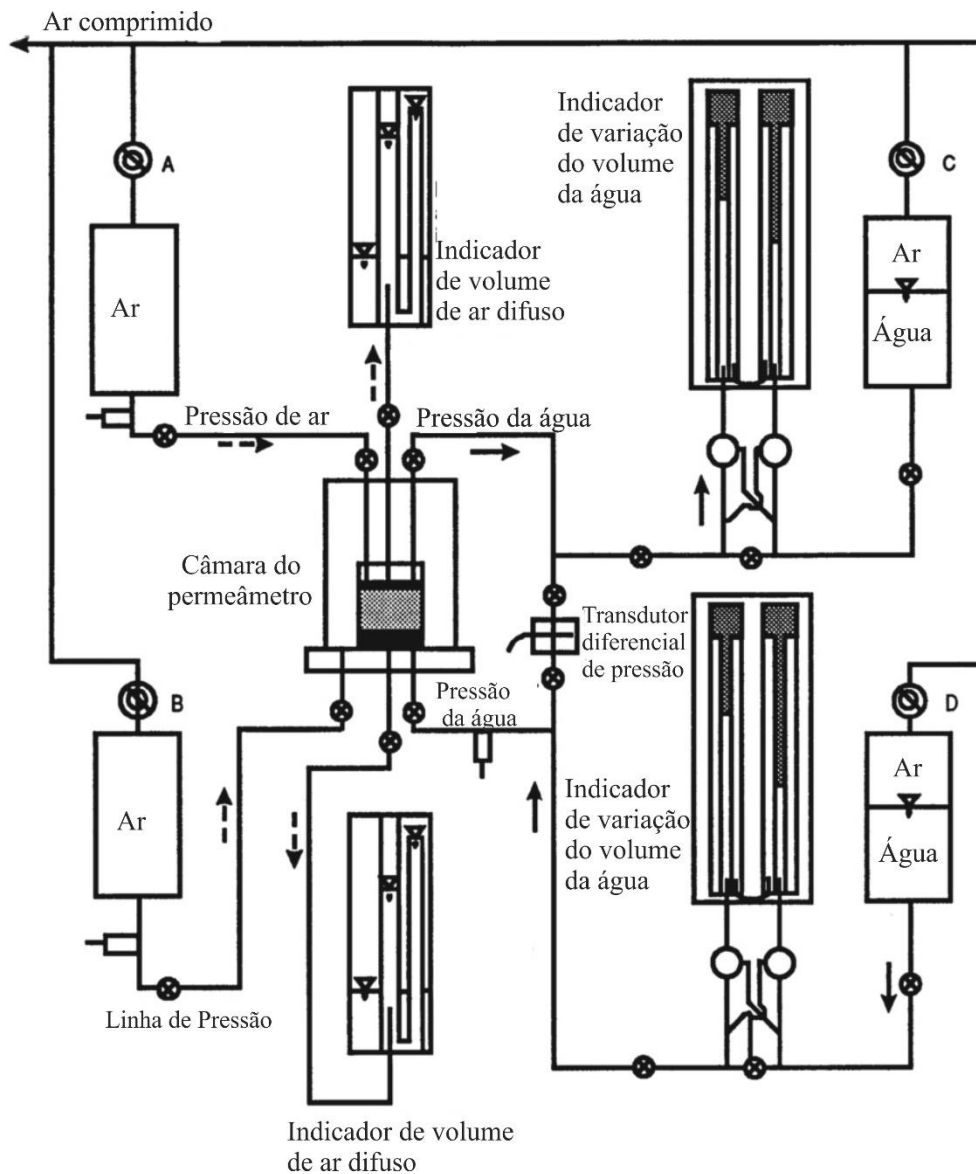
### 2.3.2 Permeâmetro triaxial para solos saturados e não saturados

Huang *et al.* (1998) fizeram um permeâmetro triaxial para a medição do coeficiente de permeabilidade de solos não saturados, no qual é possível fazer medições diretas da permeabilidade para várias combinações de esforços normais e valores de sucção mátrica.

O permeâmetro desenvolvido pelos autores tem uma câmara triaxial e um painel de controle com conexões de cobre. A câmara do permeâmetro está composta por uma cobertura cilíndrica de aço, uma base e uma tampa de alumínio. A tampa pode manter uma pressão de até

1.500 kPa. As pedras porosas empregadas, são de alto valor de entrada de ar e tem um coeficiente de permeabilidade variando entre  $2,0 \times 10^{-8} - 2,5 \times 10^{-8}$  m/s, os autores utilizaram uma cola comercial para selar as pedras porosas sobre base e o cabeçote.

O sistema do equipamento é apresentado na Figura 2.15. As linhas de pressão de ar e pressão confinante são controladas pelos reguladores A e B, respectivamente, e cada linha foi monitorada com o uso de um transdutor de pressão. A poropressão foi monitorada usando um transdutor, e a pressão diferencial, entre o topo e a base da amostra, com um transdutor diferencial de pressão com capacidade de  $\pm 14$  kPa e resolução de 0,0015 kPa. As buretas empregadas indicam a variação do volume e têm um alcance de 10 cm<sup>3</sup> e resolução de 0,02 cm<sup>3</sup>.



**Figura 2.15. Diagrama esquemático do permeametro triaxial (modificado de Huang *et al.*, 1998).**

Huang *et al.*, (1998) utilizaram areia siltosa nos ensaios, e foram medidos valores de condutividade hidráulica saturada e não saturada. Os autores concluíram que o permeâmetro teve bom desempenho para a medição da permeabilidade, e pôde fazer medições para solos saturados com permeabilidades tão baixas quanto  $5 \times 10^{-11} \text{m/s}$ , com um erro inferior a  $\pm 18\%$ , e permeabilidades para solos não saturados, com canais de ar contínuo, para valores inferiores a  $5 \times 10^{-11} \text{m/s}$ .

### **2.3.3 Permeâmetros de parede flexível com sistemas de controle de volume constante**

Dourado (2003), fez a construção de quatro permeâmetros de parede flexível com sistemas de controle de volume constante para a realização de ensaios em materiais de baixa condutividade hidráulica, como os geocompostos bentoníticos e misturas de solo com bentonita compactada.

O equipamento estava constituído por: uma câmara de confinamento composta de parede lateral (PVC), base e tampa; conexões em latão para controle de fluxo; pistão em aço inox; e cabeçote e pedestal em polietileno de alta densidade. As conexões, os tubos, o pedestal e o cabeçote foram feitos com materiais quimicamente inertes em relação ao percolante utilizado, com a finalidade de garantir a compatibilidade química entre o permeâmetro e o percolante. Além disso a incompatibilidade entre a membrana e o percolante foi resolvida com um filme de teflon entre eles.

Os quatro permeâmetros tem sistemas de volume constante, interligados por três fontes de pressão, que geram: o confinamento das amostras, saturação por contrapressão e aumento do gradiente hidráulico. Na Figura 2.16 se apresenta o esquema do sistema utilizado por Dourado (2003). As fontes de pressão de confinamento (linha 1) e contrapressão (linha 2) estão compostas por sistemas auto compensador de pressão a base de potes de mercúrio, que constituem reservatórios com interface água-mercúrio, onde a pressão imposta depende da posição respeito ao permeâmetro (até 1.200 kPa). As linhas 1 e 2 estão interligadas à linha 3 (imposição do gradiente), e as três têm acesso a um reservatório de água, e são saturadas antes do ensaio.

O autor fez os ensaios pelo método de carga variável, onde as medições do tubo capilar da variação da altura de Hg, é através de uma escala milimétrica. O gradiente de pressão (entre 190 e 400) foi imposto pela diferença entre os níveis das colunas de Hg do reservatório e do tubo capilar. Para o geocomposto bentonítico, as amostras ensaiadas tiveram uma altura de 9,85



mm e diâmetro de 100 mm, e as amostras para a mistura de solo com bentonita compactada uma altura de 32,1 mm e diâmetro de 100,5 mm.

Dourado (2003), obteve condutividades hidráulicas entre  $6,0 \times 10^{-12}$  a  $1,5 \times 10^{-11}$  m/s para as amostras do geocomposto bentonítico e em torno de  $2,0 \times 10^{-10}$  m/s para misturas de solo com bentonita.

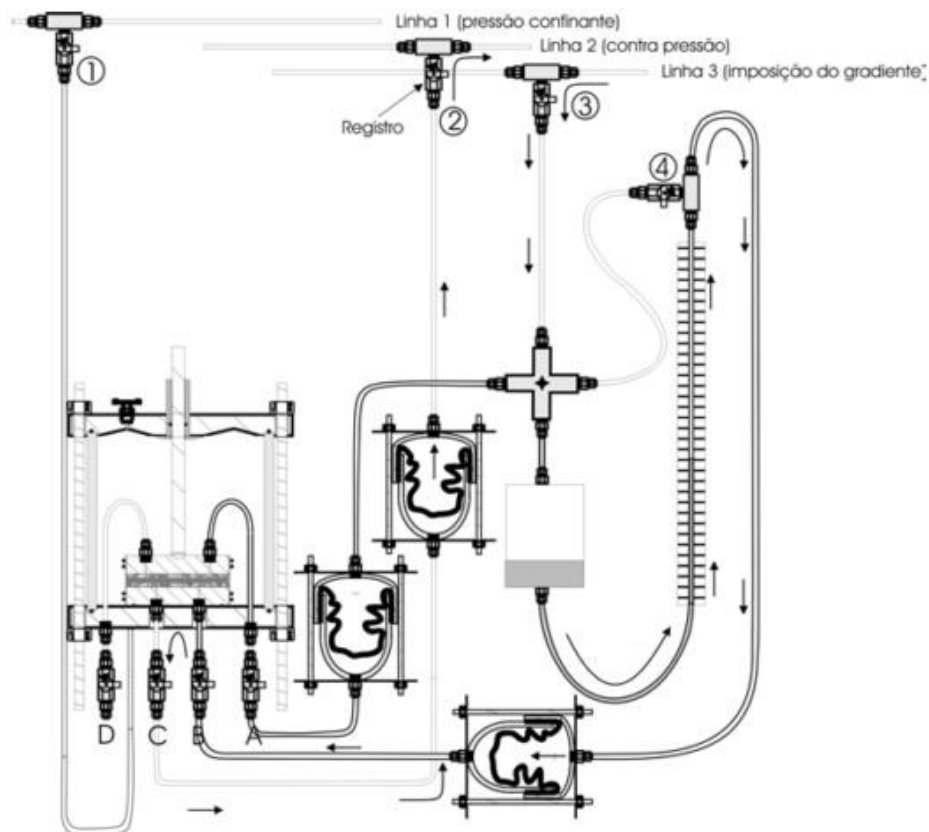
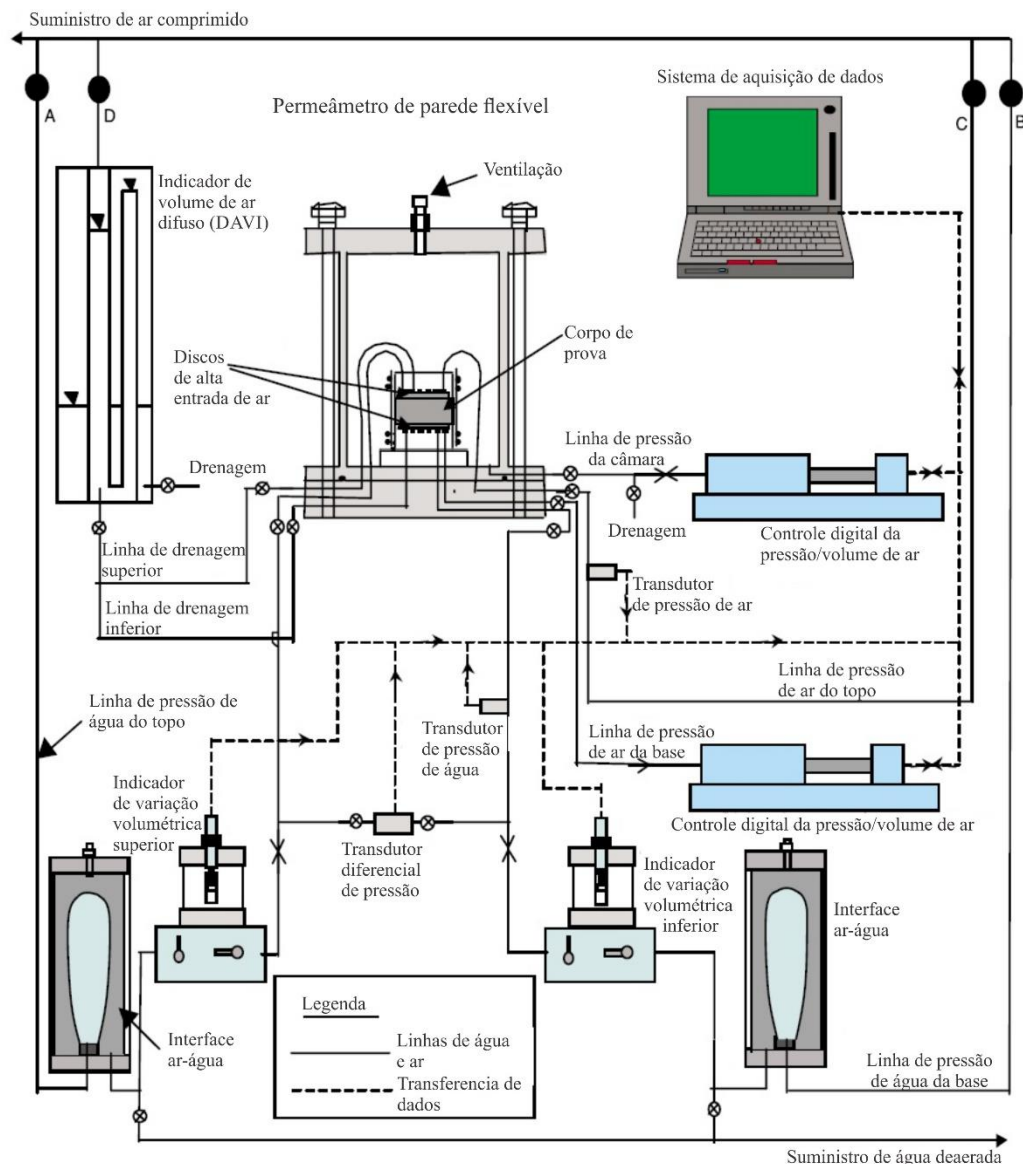


Figura 2.16. Diagrama esquemático do sistema de controle hidráulico (Dourado, 2003).

### 2.3.4 Permeâmetro de parede flexível para a determinação do coeficiente de permeabilidade de o ar e a água

Samingan *et al.* (2003), desenvolveram um permeâmetro de parede flexível que pode determinar o coeficiente de permeabilidade de o ar e a água, e medir valores altos de sucção. O equipamento foi desenvolvido para ensaios em solos não saturados, e conta com linhas de pressão de ar e água, linhas de descarga, câmara, sistemas para medição de fluxo de água e ar, e um dispositivo para medições das mudanças no volume da amostra.

A câmara do permeâmetro tem uma parede de aço inoxidável para evitar sua expansão quando for submetida a altas pressões, a tampa superior e o pedestal tem um espaço para a instalação dos discos de alta entrada de ar. O permeâmetro tem linhas de pressão de água e ar na parte superior e inferior (Figura 2.17), as linhas de pressões da água são monitoradas com um transdutor de poropressão (até 1.000 kPa), e um transdutor diferencial de pressão (-35 até + 35 kPa). A pressão confinante é fornecida por um controlador de volume digital de pressão de água (até 2000 kPa), e as linhas de drenagem descarregam do sistema o ar encontrado entre a tampa, o pedestal e os discos.



**Figura 2.17. Diagrama esquemático do permeâmetro (modificado de Samingan *et al.*, 2003).**

Samingan *et al.* (2003) fizeram ensaios em quatro amostras de solos residuais de Singapura, com diâmetro de 71 mm e altura de 30 mm. Os autores utilizaram nos ensaios o método de carga constante, devido ao fato de que o método de carga variável apresenta dificuldades para manter o estado de tensão na amostra, durante o ensaio na medição da permeabilidade em solos não saturados. Os gradientes aplicados foram entre 27 e 134.

Os autores concluíram que o equipamento pode medir coeficientes de permeabilidade de ar e água com valores de até  $10^{-12}$  m/s, e encontraram que as flutuações da temperatura afetam as medições da variação do volume total da amostra.

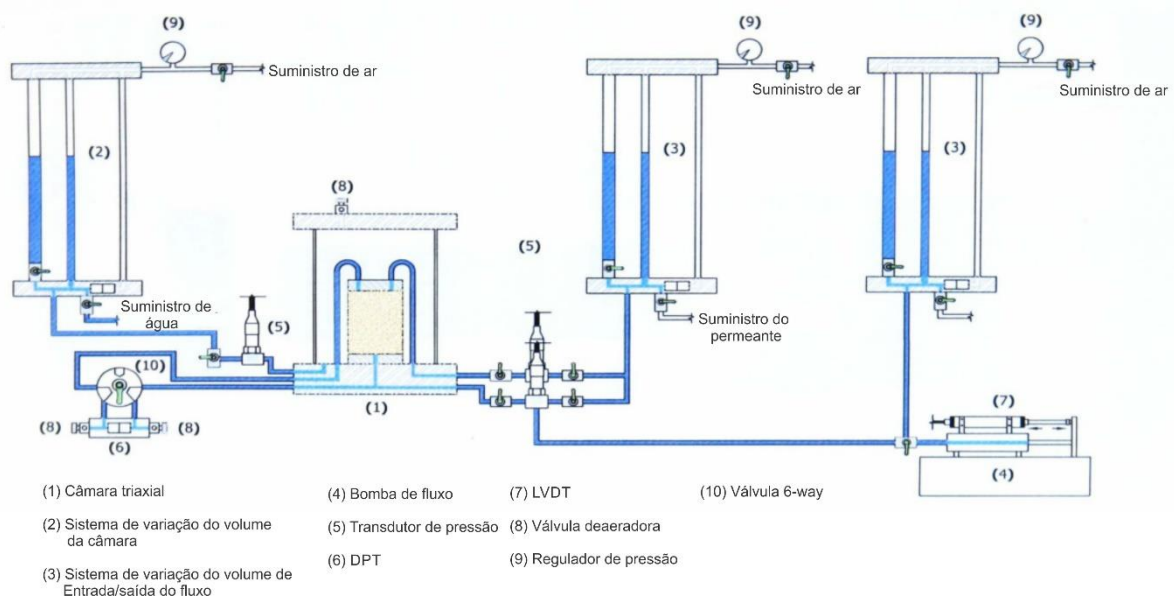
Como limitantes do equipamento, os autores mencionaram que a permeabilidade da água leva maior tempo em sua medição, do que a permeabilidade do ar, isto leva a ter maior susceptibilidade a erros, em especial para valores altos de sucção. O intervalo onde pode ser medida a permeabilidade da água é limitado pela permeabilidade dos discos de alta entrada de ar, além disso, a medição da variação do volume, indicou que o método não tem a acurácia suficiente para a deformação volumétrica envolvida no ensaio, devido a isso, o método requer melhoras para obter uma maior acurácia.

### **2.3.5 Permeâmetro de parede flexível de carga constante, fluxo constante e carga variável**

Agab (2005) fez modificações em dois permeâmetro de parede flexível com sistema de fluxo constante, para que o equipamento não só trabalhasse com este sistema mas também com carga constante e variável. Isso com a finalidade de diminuir o tempo de duração do ensaio, comparar as técnicas e poder determinar com o mesmo equipamento a condutividade hidráulica de argilas, siltes e areias finas.

Cada permeâmetro tem três componentes principais, i) câmara do permeâmetro, ii) medidores de variação do volume (dois para cada permeâmetro) e iii) bomba de fluxo. O permeâmetro tem três transdutores de pressão (pressão confinante e contrapressão superior e inferior), um transdutor de deslocamento (LVDT) e três transdutores de pressão diferencial (DPT), um para o medidor de variação do volume da câmara, outro para o medidor de variação do volume da amostra e o último para a medição da diferença de pressão no topo e base do corpo de prova. O equipamento apresenta indicadores de volume, chamados de “*Newcastle*”, desenvolvidos por Araruna (1995), os quais tem boa acurácia, são rápidos e permitem distinguir facilmente entre as etapas do ensaio. O permeâmetro conta também com um *data logger* para

aquisição de dados e um computador. Na Figura 2.18 se apresenta o diagrama esquemático do equipamento desenvolvido por Agab (2005).



**Figura 2.18. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível de carga constante, fluxo constante e carga variável (modificado de Agab, 2005)**

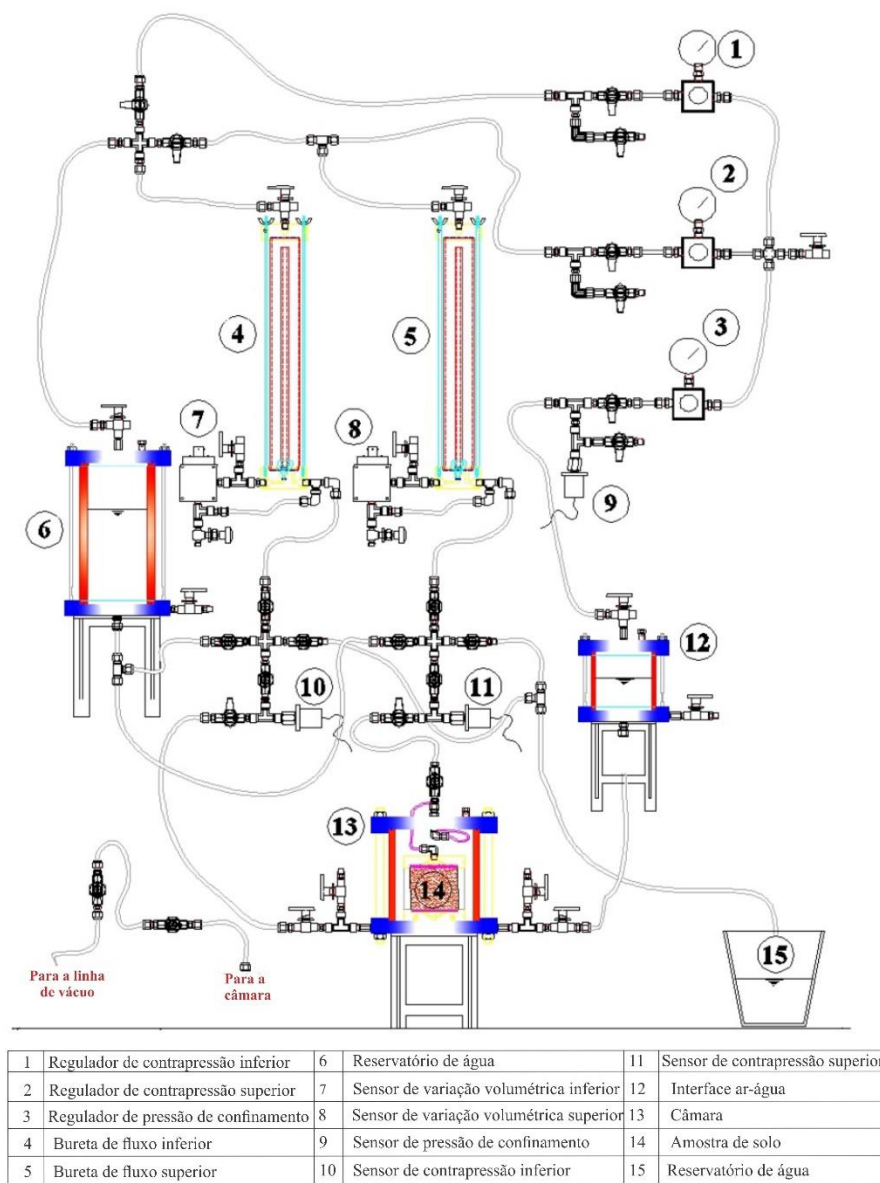
O autor fez ensaios pelo método de carga variável, carga constante e fluxo constante em amostras de argila, silte argiloso e areia fina, média e grossa. Realizou quatro ensaios nas amostras de argila para garantir a repetibilidade dos resultados e determinar a influência da aplicação de diferentes condições de tensão na condutividade hidráulica. O permeâmetro desenvolvido pelo autor, pôde fazer medições de condutividades tão baixas quanto a  $1 \times 10^{-9}$  m/s.

Agab (2005) concluiu que os equipamentos tiveram uma boa acurácia e representaram maior rapidez na determinação da condutividade hidráulica em solos finos (30-60 minutos). Além disso, o permeâmetro teve como vantagem a possibilidade de escolher o gradiente hidráulico, o qual pôde ser controlado pelas pressões de ar na entrada e saída dos medidores de volume “Newcastle”. O autor observou que a técnica de carga variável teve maior acurácia e menor tempo de ensaio do que a técnica de fluxo constante.

### 2.3.6 Permeâmetro de parede flexível e carga constante

Rosa (2008) desenvolveu um permeâmetro de carga constante e parede flexível, que permite fazer medições de permeabilidade em solos de granulometria grossa e fina.

O equipamento tem uma câmara, um reservatório de água, uma interface ar-água para aplicação da pressão confinante, três reguladores de pressão (confinante, contrapressão superior e inferior), três transdutores de pressão e um sistema de válvulas interconectadas que transportam ar a pressão para as linhas de drenagem. Além disso, tem duas buretas (fluxo superior e inferior) que armazenam o fluido utilizado no ensaio, dois sensores que registram as variações volumétricas das buretas e um sistema de aquisição de dados. O equipamento conta com um molde para abrigar as amostras tanto finas como granulares. Nas amostras granulares é aplicado vácuo, isso para manter sua estrutura durante o processo de montagem no equipamento. O esquema do permeâmetro é apresentado na Figura 2.19.



**Figura 2.19. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível e carga constante (modificado de Rosa, 2008).**

O autor realizou ensaios a carga constante em amostras de argila e de solos de permeabilidade média a alta, as amostras tinham um diâmetro de 10 cm e uma altura de 5 cm. Rosa (2008) concluiu que o equipamento pôde fazer medições de permeabilidade desde  $10^{-5}$  até  $10^{-11}$  m/s, tanto em materiais de granulometria grossa como fina, em menor tempo quando comparado com outros métodos existentes.

### 2.3.7 Adaptação de um equipamento triaxial para medição da condutividade hidráulica

Silveira (2008) adaptou um equipamento triaxial para a execução de ensaios de condutividade hidráulica. O permeâmetro desenvolvido (Figura 2.20) conta com: uma câmara triaxial com capacidade de pressão de até 1.500 kPa, microcomputador para o controle do equipamento e a aquisição automática de dados, prensa de servo-controle, célula de carga interna (5 kN), um transdutor de pressão (1.500 kPa) para medições da poropressão, um transdutor de deslocamento, compressor de ar, reservatório de água e um painel que possui duas buretas e dois manômetros de aplicação manual de pressões.

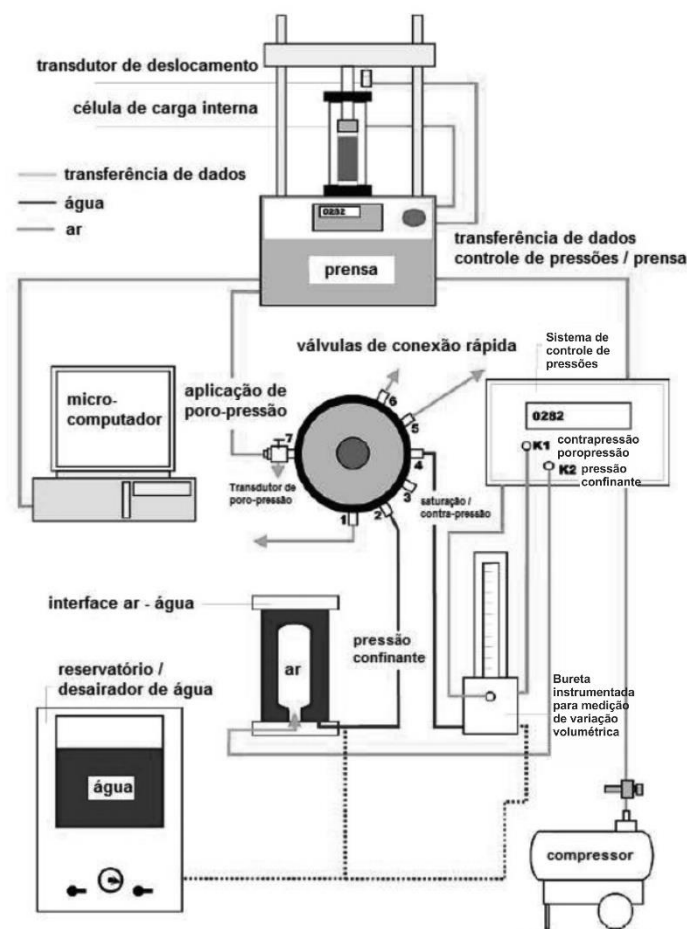


Figura 2.20. Diagrama esquemático do permeâmetro de parede flexível do equipamento triaxial (Silveira, 2008).

O autor fez os ensaios num solo coluvionar de uma encosta em São Vendelino (RS), em amostras indeformadas com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, e empregou um gradiente hidráulico de 10. Os ensaios foram realizados a carga constante, obtendo valores de condutividade hidráulica entre  $1,1 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-4}$  m/s. Silveira (2008) concluiu que devido à ausência de um sistema de aplicação e controle mais preciso das pressões, os resultados da permeabilidade apresentaram dispersão.

### 2.3.8 Validação de um permeâmetro de parede flexível

Olandoski (2013) fez a validação de um permeâmetro de parede flexível, para isso realizou ensaios de condutividade hidráulica em amostras deformadas de silte arenoso com pedregulho, e em misturas deste solo com borracha triturada. O autor fez também ensaios de condutividade hidráulica em um permeâmetro de parede rígida e os resultados obtidos por ambos permeâmetros foram comparados.

O permeâmetro de parede flexível (Figura 2.21) apresenta uma câmara confinante de acrílico com capacidade de 1.500 kPa, um painel de aplicação e controle de pressões, transdutor de pressão para a leitura da poropressão, termômetro eletrônico, microcomputador para recepção e recebimento de dados adquiridos por um *data logger* (equipamento para aquisição de dados). As válvulas reguladoras no painel estiveram conectadas a um compressor de ar e as pressões foram aplicadas diretamente na água contida nas buretas.

O autor fez ensaios em amostras de 50 mm de diâmetro e altura, o método de ensaio foi de carga constante e utilizou um gradiente hidráulico de 10. Os resultados obtidos por Olandoski (2013), nos ensaios da condutividade hidráulica (Tabela 2.5), estiveram dentro da mesma ordem de magnitude e no intervalo de permeabilidade para solos em condições similares encontrados na literatura.

**Tabela 2.5. Resultados obtidos dos ensaios feitos por Olandoski (2013).**

Solo	Condutividade hidráulica k (m/s)	
	Permeâmetro de parede rígida	Permeâmetro de parede flexível
Sem Borracha	$3,89 \times 10^{-8}$	$3,58 \times 10^{-8}$
Mistura de solo com 20% em massa de borracha triturada	$2,10 \times 10^{-8}$	$3,36 \times 10^{-8}$

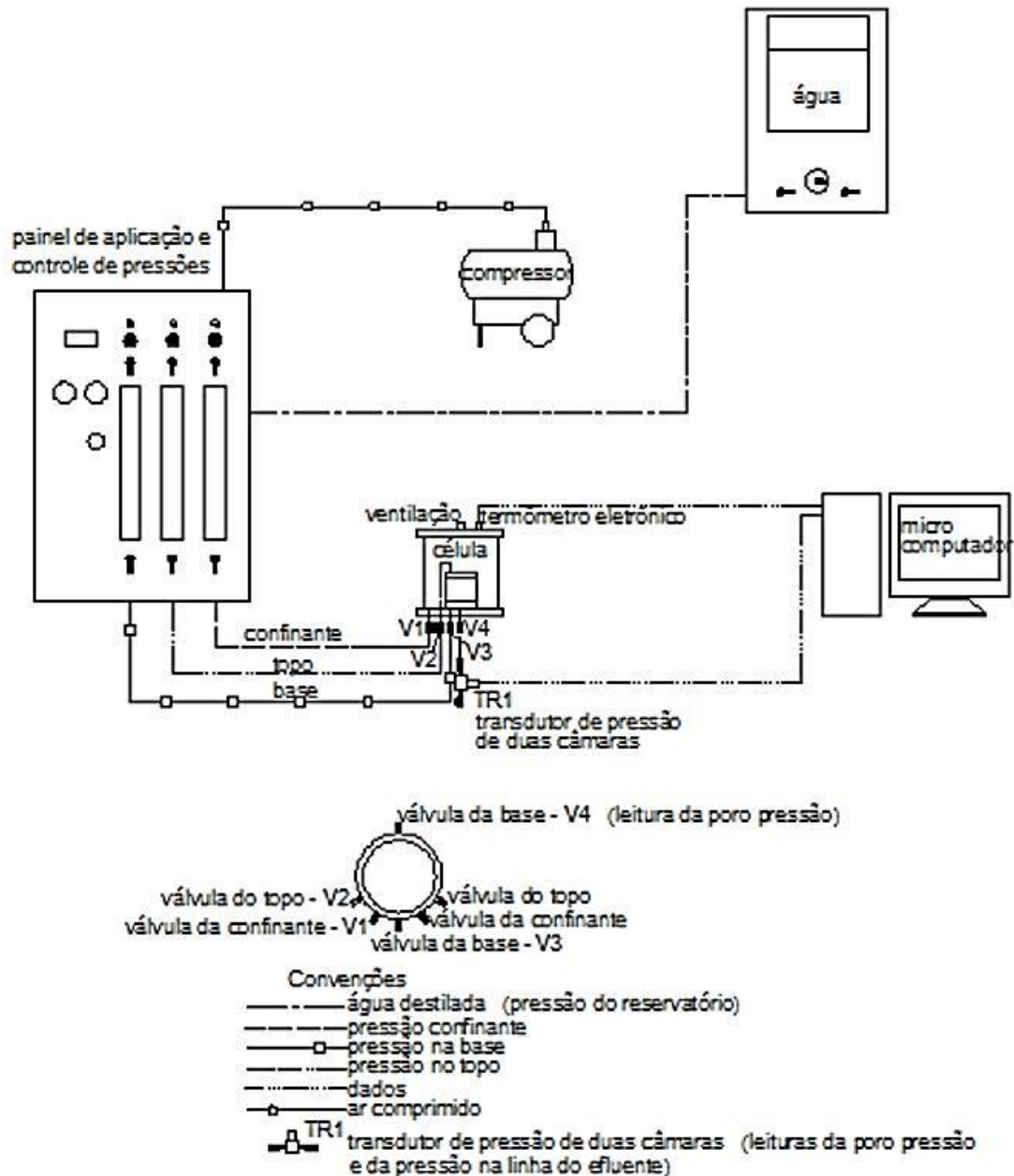


Figura 2.21. Diagrama esquemático do equipamento (Olandoski, 2013).

## 2.4 ABORDAGEM TEÓRICA DO ENSAIO DE CONTUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica de materiais porosos geralmente tem decréscimos com o aumento da quantidade de ar presente no solo, por isso o ensaio para a sua determinação é aplicado a materiais porosos saturados que não contenham nenhum poro de ar (D5084-10-ASTM, 2010). Considerações como a validade da lei de Darcy e que a condutividade hidráulica



é afetada significativamente pelo gradiente hidráulico são levadas em conta para a realização deste ensaio, adicionalmente também são consideradas variáveis como a tensão efetiva, o grau de saturação e a contrapressão. A seguir são descritas cada uma destas variáveis necessárias para o entendimento dos ensaios realizados em permeâmetros de parede flexível.

#### **2.4.1 Tensão efetiva e índice de vazios**

A tensão efetiva é a tensão que atua nos contatos grão a grão, respondendo pelas características de deformabilidade e resistência ao cisalhamento do solo. Quando se tem percolação de água, a tensão efetiva em qualquer ponto de uma massa de solo será diferente daquela do estado estático, ela aumentará ou diminuirá, dependendo da direção da percolação (Das, 2007).

A tensão efetiva de uma amostra de solo, sempre vai ser maior no extremo da amostra por onde a água sai do que por onde entra, e quanto maior for o gradiente hidráulico maior será essa diferença. Um aumento na tensão efetiva provocará uma redução no índice de vazios e na condutividade hidráulica e, conseqüentemente, se apresentará uma tendência na amostra de ter uma condutividade menor no extremo por onde a água vai sair. A importância de uma tensão efetiva maior na saída é mais significativa em solos compressíveis, do que em solos relativamente incompressíveis (Daniel, 1994). Por outro lado, Agab (2005) verificou que a condutividade hidráulica aumenta com o acréscimo do índice de vazios e que o tamanho do grão tem um grande efeito sobre a permeabilidade em amostras argilosas. Além disso afirma, que a condutividade hidráulica diminui com o acréscimo da densidade, porque seu aumento reduz a porosidade da amostra. O autor concluiu que os três fatores, índice de vazios, densidade e tensão efetiva estão relacionados e uma mudança em um deles afetará os outros, e portanto um aumento da tensão efetiva diminuirá o índice de vazios, aumentará a densidade e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica será reduzida.

Os solos altamente compressíveis ou com características secundárias, como microporos, fraturas, juntas e fendas, são os mais sensíveis às variações de tensão efetiva (Daniel, 1994). Em todos os casos, a variação da tensão efetiva gera variações no volume do solo e conseqüentemente na condutividade hidráulica, já que está relacionada com o volume de poros (Agab, 2005). Daniel (1994) afirma que tensões efetivas com valores muito altos não devem ser utilizadas em materiais de baixa condutividade hidráulica, isso devido a que sua permeabilidade pode ser reduzida de forma significativa.

Boyton e Daniel (1985) avaliaram o efeito da tensão efetiva na condutividade hidráulica, e de acordo com seus resultados eles afirmam que tensões efetivas maiores a 56 kPa, geram fechamentos de fissuras na amostra de solo e, conseqüentemente, redução da condutividade hidráulica. Por outro lado, tensões efetivas entre 14 e 28 kPa levam a fechamento parcial das fissuras, e maiores valores de condutividade hidráulica. Os autores recomendam, tomar precauções quando sejam ensaiados solos que serão submetidos a pequenas tensões efetivas no campo, pois a utilização de excessivas pressões confinantes no laboratório pode levar a valores errados da condutividade hidráulica. Daniel (1994), indica utilizar um valor da tensão efetiva de 14 kPa para evitar o fluxo entre a membrana e o solo, enquanto a norma ASTM D5084-10 (2010) indica um valor de apenas 7 kPa.

Daniel (1994) e Chen (1997) recomendam que para a determinação da condutividade hidráulica, os ensaios devem ser realizados num nível de tensão correta, levando em conta os níveis de tensão *in situ* e o nível de tensão final depois do carregamento ou descarregamento.

#### 2.4.2 Gradiente hidráulico

Geralmente os gradientes hidráulicos em condições de campo têm valores entre um e a cinco. Porém, para solos com baixa permeabilidade, valores maiores são usados no laboratório para a realização de ensaios em menor tempo (D5084-10-ASTM, 2010). Entretanto, valores muito altos podem gerar adensamento na amostra e, conseqüentemente, a redução do valor da permeabilidade (Kodikara & Rahman, 2002), além de arraste de partículas no fluxo que podem obstruir o equipamento. Devido a isto a norma ASTM D5084-10 (2010) recomenda os valores máximos dos gradientes hidráulicos mostrados na Tabela 2.6 de acordo com o valor da condutividade hidráulica a ser medido no solo.

**Tabela 2.6. Gradiente hidráulico máximo**

Condutividade hidráulica m/s	Gradiente hidráulico máximo recomendado
$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-6}$	2
$1 \times 10^{-6}$ a $1 \times 10^{-7}$	5
$1 \times 10^{-7}$ a $1 \times 10^{-8}$	10
$1 \times 10^{-8}$ a $1 \times 10^{-9}$	20
$< 1 \times 10^{-9}$	30

Na Tabela 2.7 se apresentam os gradientes hidráulicos utilizados nos ensaios com os permeômetros de parede flexível apresentados no item 2.3, além dos valores de contrapressão empregados e os valores do parâmetro B de Skempton atingidos pelos autores.

**Tabela 2.7. Valores do gradiente hidráulico, contrapressão e B utilizados em ensaios com permeâmetros de parede flexível.**

Autor	Gradiente hidráulico	Contrapressão kPa	Pressão confinante (kPa)	Parâmetro B	Material utilizado
Rodríguez (1996)	5	393	490	*	Argila de alta plasticidade
Dourado (2003)	50-400	290	330	*	Geocomposto bentônico
Samingan <i>et al.</i> (2003)	27 - 134	*	*	*	Solo residual de Singapura
Agab (2005)	10,20,30,40	450	470	0,98	Argila
Silveira (2008)	10	570	600	*	Solo coluvionar
Olandoski (2013)	10	690	700	0,93	Solo silte arenoso
	10	470	500	0,97	Solo silte arenoso + 20% borraça

\*Valores não registrados pelos autores

Samingan et al. (2003) afirma que a utilização de gradientes hidráulicos excessivamente altos não é recomendável, porém a utilização de gradientes baixos quando são realizadas medições de condutividades hidráulicas muito baixas não é desejável devido a que a relação entre a velocidade de fluxo e o gradiente hidráulico se torna não linear e conseqüentemente a lei de Darcy não tem validade. O autor concluiu que a amostra utilizada não foi afetada pelos altos gradientes hidráulicos empregados, especialmente para valores elevados de sucção matricial, e validou a lei de Darcy estabelecendo uma relação linear entre a taxa de fluxo e o gradiente hidráulico utilizado.

### 2.4.3 Grau de saturação

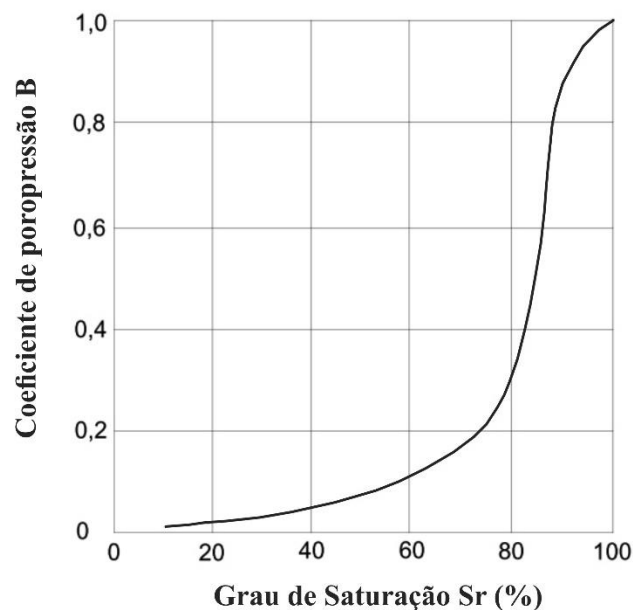
Para o ensaio de condutividade hidráulica, a amostra de solo deve estar saturada, esta é realizada utilizando contrapressão e tomando cuidado de não alterar a estrutura do solo. A saturação pode ser verificada através do parâmetro B de Skempton (Daniel, 1994), o qual é definido pela seguinte equação:

$$B = \frac{\Delta u_w}{\Delta \sigma_c} \quad (2.13)$$

onde,  $\Delta u_w$  é o acréscimo da poropressão e  $\Delta \sigma_c$  é o acréscimo da tensão confinante.

O valor do coeficiente B será menor, quanto maior seja a quantidade de ar presente na amostra de solo (Daniel, 1994). De modo que quando o solo está completamente saturado e não há presença de ar no solo, a poropressão vaise igualar à pressão da câmara, e o parâmetro B será igual a um. Porém para solos rígidos ou rochas, o coeficiente será menor do que 1, inclusive estando a amostra completamente saturada (Skempton, 1954). Segundo a norma ASTM D5084-10 (2010) uma amostra de solo é considerada saturada quando  $B \geq 0,95$ . Apresenta-se na Figura

2.22 a relação entre o parâmetro B de Skempton e o grau de saturação de um corpo de prova saturado mediante a utilização de contrapressão.



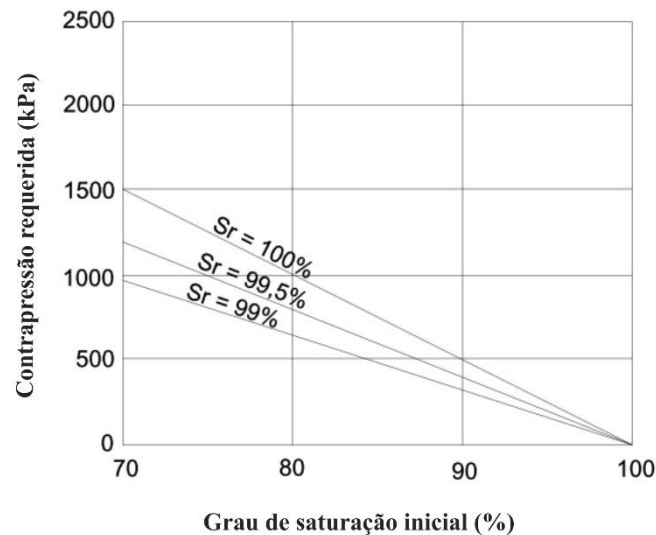
**Figura 2.22. Relação entre o parâmetro B de Skempton e o Grau de saturação** (Head, 1986).

#### 2.4.4 Contrapressão

O processo de saturação por contrapressão consiste na aplicação de pressões de igual valor na base e no topo da amostra. Este procedimento se faz com a finalidade de dissolver o ar ocluído nos poros da amostra e facilitar o processo de saturação do solo, isto pode durar de poucas horas até vários dias dependendo do tipo de material (Dourado, 2003).

O nível de contrapressão utilizada pode ser selecionado de acordo com o grau de saturação inicial da amostra ou com o tempo desejado para completar o processo de saturação. Para o primeiro devem ser empregadas altas contrapressões para graus de saturação baixos, e para uma saturação mais rápida devem-se aplicar também altas contrapressões (Daniel et al., 1985; D5084-10-ASTM, 2010). Head (1986) apresenta um ábaco dos valores que deve ter a contrapressão para atingir a saturação (Figura 2.23). O ábaco baseia-se na suposição, que a água utilizada para o processo de contrapressão é deaerada, e que a única fonte de ar a dissolver-se na água é o ar da amostra de solo (Head, 1986; D5084-10-ASTM, 2010). De acordo com (Head, 1986), é inviável na prática atingir os valores de contrapressão apresentados neste ábaco para a saturação das amostras, e recomenda que se as pressões utilizadas são o suficientes para atingir um valor de B próximo a um, os valores apresentados nele não são relevantes.

No início do ensaio, o nível da contrapressão não tem influência na condutividade hidráulica, são a tensão efetiva e o grau de saturação que controlam a condutividade, porém se a contrapressão é aplicada na amostra de forma rápida, esta será submetida a tensões de adensamento durante este processo (Daniel, 1994).



**Figura 2.23. Valores de contrapressão para vários graus de saturação modificado de Head (1986).**

Lowe & Johnson (1960) e Head (1986) apresentam uma função teórica que permite determinar a contrapressão necessária para alcançar um determinado grau de saturação final na amostra, esta equação é apresentada a seguir:

$$u = 99,299 \cdot \frac{(S_r - S_{ro})}{1 - S_r \cdot 0,98} \quad (2.14)$$

onde,  $S_r$  é o grau de saturação final requerido para o solo e  $S_{ro}$  é o grau de saturação inicial do solo.

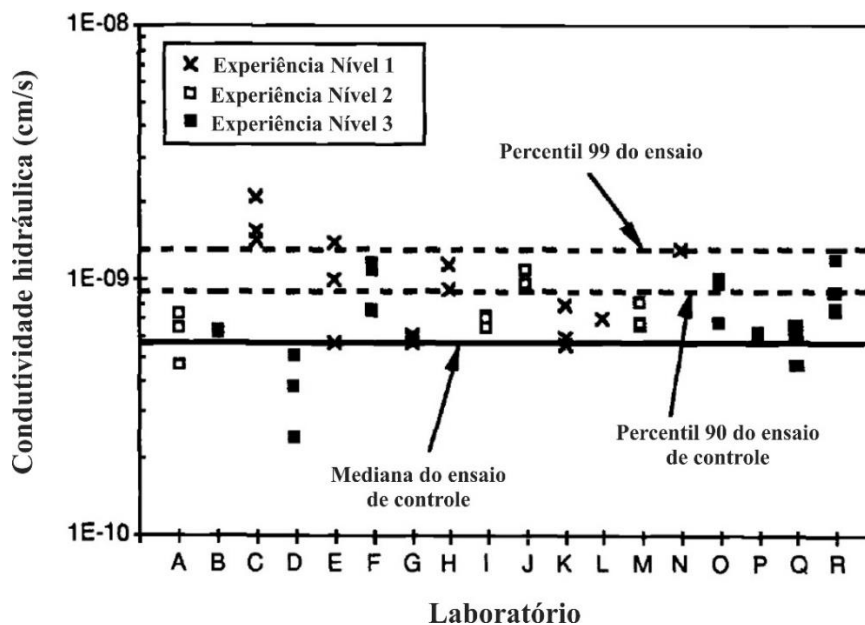
## 2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE EM ENSAIOS DE LABORATORIO

Alguns dos fatores que determinam a precisão na determinação dos valores da condutividade hidráulica nos ensaios de laboratório são: temperatura, viscosidade do fluido, bolhas de ar aprisionadas na amostra, grau de saturação da amostra, migração de material durante o ensaio e a reprodução das condições de campo (Das, 2007). Além disso, o uso de tensões confinantes muito altas podem gerar erros nos resultados obtidos (Boyton & Daniel,

1985). Outro fator que influência é a aplicação de gradientes hidráulicos altos, que podem originar alterações na amostra com respeito as suas tensões efetivas (Caberlon, 2004). O efeito destas alterações pode gerar redução do índice de vazios, adensamento e diminuição da condutividade hidráulica (Daniel, 1994).

De acordo com Whitlow (1995), os problemas relacionados com a confiabilidade de ensaio de laboratório para determinar a condutividade hidráulica podem ser: i) obtenção de amostras representativas, ii) confiabilidade das medidas de laboratório e iii) reprodução das condições de campo.

Daniel et al. (1997) fizeram um estudo com a finalidade de comparar os resultados obtidos por diferentes laboratórios na determinação da condutividade hidráulica de um geocomposto bentonítico. Estes laboratórios foram classificados de acordo com a sua experiência na realização de ensaios de condutividade hidráulica neste tipo de material. Os resultados obtidos demonstraram que o valor da condutividade hidráulica apresentou, em cada um dos laboratórios estudados, variações em uma ordem de grandeza, sendo apresentados os maiores valores de  $k$  para os laboratórios menos experientes (nível 1). Isto, é atribuído à variação do material ensaiado e à variabilidade própria do ensaio. De acordo aos resultados encontrados (Figura 2.24), os autores afirmam que aparentemente o único fator que influenciou na medição do valor de  $k$ , foi a experiência do laboratório, apresentando-se problemas na preparação das amostras.



**Figura 2.24. Resultado de ensaios de condutividade hidráulica em geocomposto bentonítico, modificado de (Daniel et al., 1997).**

### 3 MÉTODOS E MATERIAIS

A metodologia escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa teve como finalidade definir os procedimentos que foram necessários para a construção do equipamento proposto. Para isto, foi fundamental conhecer cada um dos componentes do permeâmetro e a sua função no sistema, além das condições e recursos disponíveis no laboratório para sua instalação. Levando isso em consideração, a metodologia foi dividida em quatro etapas: i) projeto, ii) construção, iii) instrumentação e iv) operação do equipamento. Para a última etapa, foi utilizada uma amostra indeformada do Campo Experimental da UnB, uma descrição geral do solo e a explicação da sua moldagem no laboratório é apresentada também neste capítulo.

#### 3.1 ETAPA 1: PROJETO

A revisão bibliográfica realizada ajudou a ter uma visão ampla do funcionamento dos permeâmetros de parede flexível. Com a finalidade de construir um equipamento eficiente e inovador, no seu projeto foram consideradas as principais vantagens dos permeâmetros estudados e algumas melhorias foram implementadas. Em primeiro lugar foi realizada a identificação de todos os componentes do permeâmetro necessários para o seu funcionamento, tais como câmara, base, cabeçote, conexões, válvulas, mangueiras, reservatório, transdutores, etc. Também, foi realizada uma visita ao Laboratório de Geotecnia da pós-graduação, com a finalidade de conhecer as condições que o equipamento seria construído. Depois com toda essa informação, foi realizado o projeto do permeâmetro, no qual foram definidas todas as peças e conexões necessárias para o seu funcionamento.

#### 3.2 ETAPA 2: CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

Após de ter o projeto do permeâmetro definido, procede-se com a etapa dois, desenvolvida a partir do seguinte procedimento:

1. Primeiro foi realizada uma lista com os componentes necessários para a construção do permeâmetro, e a checagem da disponibilidade deles no Laboratório de Geotecnia da pós-graduação, isto com a finalidade de conhecer os componentes do permeâmetro que deviam ser comprados e as peças que precisavam ser usinadas.

2. Finalizado o passo anterior, se prosseguiu a cotação e compra dos componentes que não se encontravam disponíveis no laboratório, e a usinagem das peças necessárias. Estas peças foram usinadas pelo Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.
3. Por último, foi realizada a montagem de todos os componentes do permeâmetro, de acordo ao projeto elaborado na primeira etapa.

### **3.3 ETAPA 3: INSTRUMENTAÇÃO**

O desenvolvimento tecnológico dos materiais tem permitido grandes avanços em todos os ramos da engenharia, por isso as normas exigem que os resultados dos ensaios de laboratório sejam cada vez mais confiáveis, procurando garantir sua repetibilidade com a devida instrumentação dos equipamentos (Cooper & Helfrick, 1991; Monroy et al., 2009). Levando isto em consideração, o equipamento foi instrumentado com três transdutores de pressão e um sistema automático de aquisição de dados.

Para o desenvolvimento da instrumentação do equipamento, primeiramente foi necessária a adaptação das conexões dos cabos dos transdutores, com o sistema de aquisição de dados, sempre levando em consideração as instruções do manual do fabricante. A seguir foram realizadas as calibrações dos transdutores e sua instalação no equipamento junto com a instalação do *data logger*. As calibrações obtidas para cada sensor está apresentada no Apêndice B.

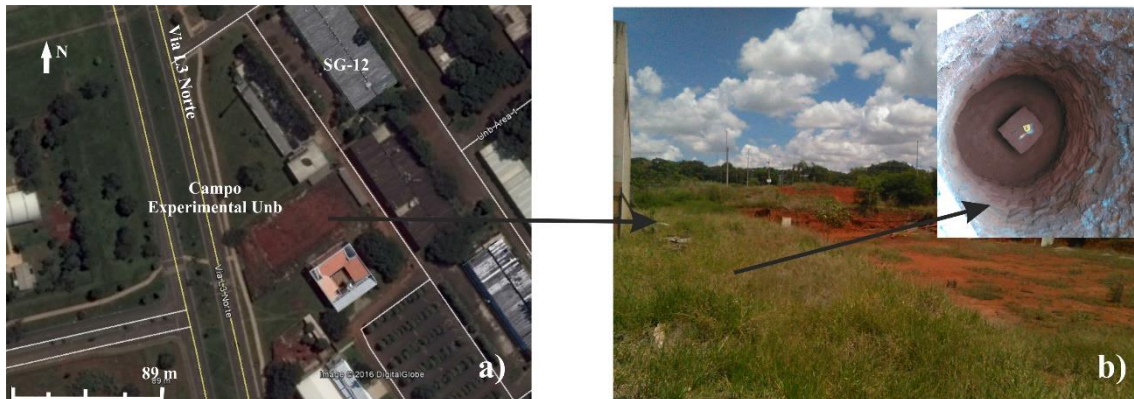
### **3.4 ETAPA 4: OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO**

Esta etapa teve como finalidade testar o equipamento a fim de solucionar os problemas que puderam acontecer, e assim validar os processos propostos de: saturação do sistema, montagem da amostra, percolação, saturação da amostra, e determinação da condutividade hidráulica. Nesta etapa foram realizadas os procedimentos de operação do equipamento, no qual foram descritos os procedimentos para preparação e montagem da amostra e finalmente desenvolvimento do ensaio.



### 3.5 MATERIAL UTILIZADO E MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA- METODOLOGIA

O material utilizado para realizar o ensaio de condutividade hidráulica, foi uma amostra indeformada de argila, do Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo da Universidade de Brasília, UnB (Figura 3.1), localizado nas coordenadas 15° 45' 58,02'' sul e 47° 52' 22,00'' oeste, numa elevação de 1050 m.s.n.m. (metros sobre o nível do mar), perto ao bloco SG12 do programa de pós-graduação em geotecnia da UnB.



**Figura 3.1. (a) Localização do campo Experimental da UnB, (b) local de extração do bloco inalterado.**

Os solos do campo experimental da UnB em estado natural encontram-se bem drenados, mesmo quando tem até 90% de presença de argila, a qual é normalmente agregada em grãos de textura arenosa e apresenta alta permeabilidade (Guimarães, 2002; Cavalcante et al., 2006). Estes solos têm características semelhantes aos solos encontrados na maior parte do Distrito Federal, DF (Cavalcante et al., 2006). O perfil típico deste solo é de uma camada de solo laterítico vermelho argiloso (Mota, 2003), que devido ao alto grau de intemperismo e lixiviação com que foram formados, tem uma estrutura porosa, metaestável, com altos índices de vazios e, conseqüentemente, baixos pesos específicos. Esta argila do DF é denominada de “argila porosa”, e sua alta porosidade e suas ligações cimentíceas, geram uma estrutura altamente instável com o aumento de umidade ou alteração do estado de tensões, apresentando variações bruscas de volume (Guimarães, 2002).

Com respeito aos valores de condutividade hidráulica para esta argila, Silva (2007) realizou ensaios em permeômetros de parede rígida com carga constante, e em permeômetros de parede rígida com bentonita com carga variável. O autor usou amostras indeformadas extraídas de uma profundidade de 2,5 m, e obteve valores de  $6,21 \times 10^{-6}$  m/s (carga constante) e

$6,05 \times 10^{-6}$  m/s (carga variável). Oliveira (2003) fez ensaios em permeâmetros de parede flexível numa câmara triaxial. Este autor utilizou também amostras indeformadas extraídas a uma profundidade de 2,6 m e obteve uma condutividade hidráulica de  $5,0 \times 10^{-7}$  m/s utilizando um gradiente hidráulico de 10.

Nesta pesquisa, o corpo de prova para a realização do ensaio, foi extraído de uma amostra indeformada coletada de um poço a 5 m de profundidade, este poço foi escavado no desenvolvimento da pesquisa de Burgos (2016). Na Tabela 3.1 apresenta-se a caracterização geotécnica da amostra de solo.

**Tabela 3.1. Características geotécnicas** (Guimarães, 2002; Burgos, 2016).

Parâmetro	Valor
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,94
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	11,96
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,95
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,53
G <sub>s</sub>	2,76
e	1,42
n (%)	59,0
w <sub>L</sub> (%)	39
w <sub>P</sub> (%)	29
I <sub>P</sub>	10
I <sub>a</sub>	0,46
Pedregulho (%)	1,4
Areia (%)	31,6
Silte (%)	26,5
Argila (%)	40,5

### 3.5.1 Moldagem da amostra de solo

A moldagem da amostra de solo indeformada realiza-se de acordo com o seguinte procedimento (Figura 3.2). Para realizar este procedimento foi utilizada a peça descrita no item 4.3.5.

1. Coloca-se o bloco indeformado de solo na bancada, e com auxílio de um estilete e uma espátula nivela-se a superfície onde a amostra será extraída.
1. Coloca-se o tubo de aço, para moldagem de amostras indeformadas, na superfície nivelada e se introduz no solo. Com a finalidade de facilitar este processo utiliza-se

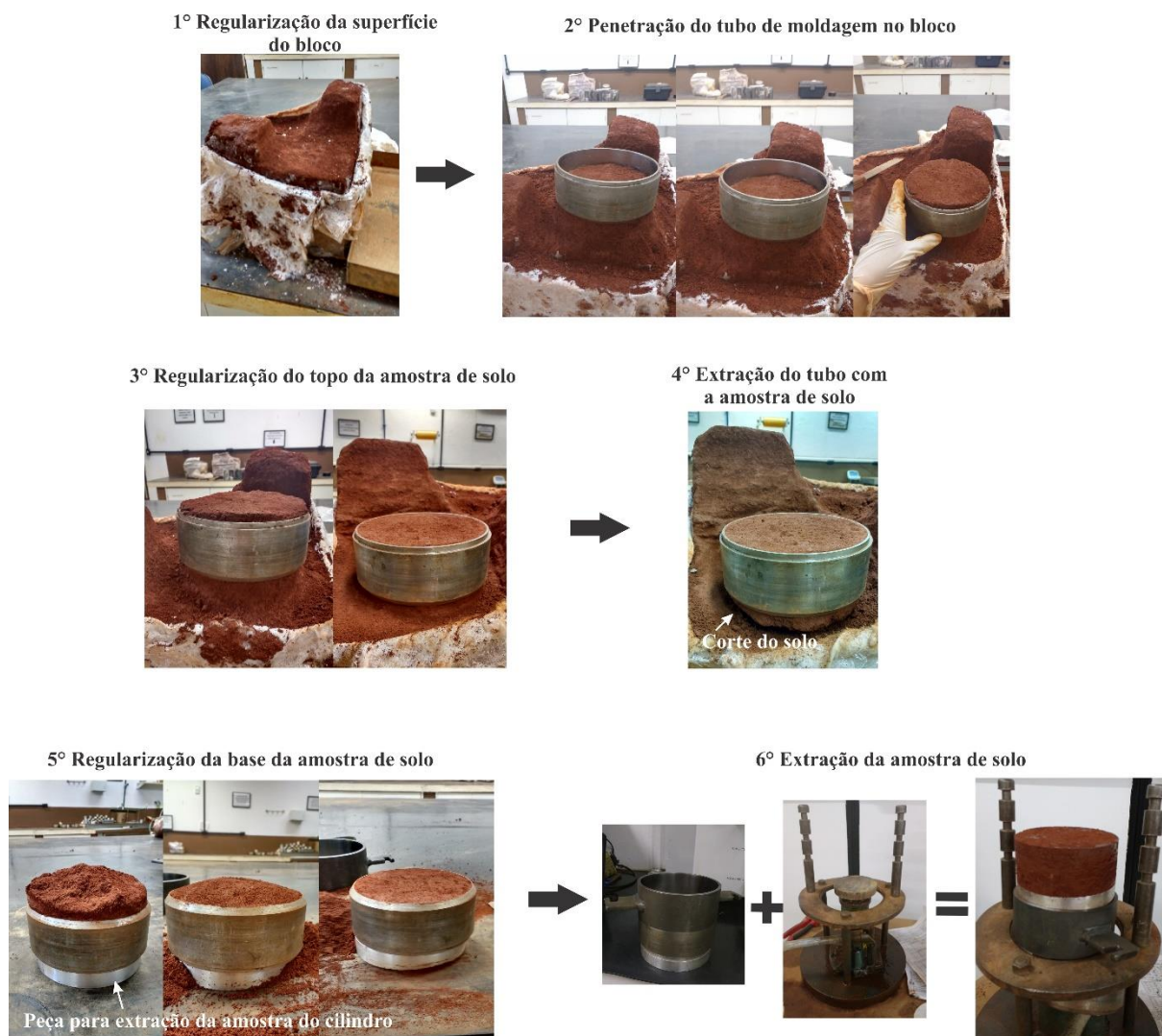
uma espátula e um estilete para cortar o solo em torno ao tubo, sempre tomando cuidado de não deformar a amostra. Antes da realização deste processo é necessária a utilização de vaselina no tubo de moldagem para facilitar a extração do corpo de prova.

2. Quando todo o comprimento do tubo de moldagem encontra-se introduzido no solo, regulariza-se o topo da amostra.
3. Realiza-se a extração do tubo com amostra do bloco inalterado, cortando o solo numa altura maior à altura desejada (5,5 cm).
4. Coloca-se o tubo com amostra de solo com o topo para baixo, e regulariza-se a base da amostra com o auxílio de uma espátula. Para isso realizar movimentos de dentro para fora, com a finalidade de evitar o fissuramento da amostra.
5. Para a extração da amostra de solo utiliza-se a base de alumínio, o cilindro para compactação e o macaco hidráulico. O cilindro se encaixa sobre o tubo com amostra e se puxa para baixo com cuidado e sem aplicar muita força para a extração do corpo de prova. Neste passo é necessária a utilização de vaselina para facilitar a extração do corpo de prova.
6. Determina-se o teor de umidade ( $w$ ), conforme a ABNT (1986), com parte do solo sobrando da moldagem.
7. Determinam-se as dimensões do corpo de prova e sua massa ( $M$ ) com resolução de 0,1 gr.

Uma vez realizada a moldagem descrita no procedimento anterior foram obtidas as dimensões da amostra, e sua umidade com o solo sobrando da moldagem. Os dados iniciais da amostra de solo são apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2. Dados iniciais da amostra de solo indeformada**

<b>w (%)</b>	<b>Sr (%)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>
25,4	49,3	5,6	12,98



**Figura 3.2. Procedimento de moldagem da amostra de solo indeformada**

### 4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PERMEÂMETRO

Para o projeto e construção do permeâmetro de parede flexível e carga constante, foi tomado como base o permeâmetro desenvolvido por Rodríguez (1996), no qual foram realizados melhoramento no equipamento, como a possibilidade de imposição de maiores valores de gradientes hidráulicos, maior acurácia e precisão nas medições pela instalação de transdutores de pressão e possibilidade de aplicação de tensão desviadora.

Para o projeto do equipamento se levaram em consideração as recomendações realizadas por Daniel (1994) e pelas normas ABNT (2000); D5084-10-ASTM (2010). Além das dissertações, teses e artigos de diversos autores (Huang et al., 1998; Dourado, 2003; Samingan et al., 2003; Agab, 2005; Rosa, 2008; Silveira, 2008; Olandoski, 2013) que subsidiaram no entendimento do funcionamento do equipamento, e conseqüentemente em sua construção. Neste capítulo, será descrito o desenvolvimento das etapas 1 e 2 expostas na metodologia. Primeiramente serão explicadas de forma geral as características do equipamento, a seguir, o procedimento no que foi realizado o projeto do permeâmetro, logo o processo para sua construção e por último, o detalhamento das partes que o compõem.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PERMEÂMETRO

Primeiramente se fez uma listagem das principais características consideradas no projeto e construção do permeâmetro de parede flexível, nas quais são ressaltadas as vantagens e inovações realizadas no equipamento desenvolvido nesta pesquisa.

##### 1. Controle das tensões na amostra

No equipamento é possível ter o controle das tensões aplicadas na amostra, isto permite que os ensaios realizados apresentem maior proximidade com as condições naturais que o solo tem em campo.

##### 2. Parede flexível

Com a utilização da membrana flexível de látex os fluxos laterais de contato gerados no corpo de prova são minimizados, isto se deve a que a membrana se acomoda com facilidade à superfície irregular da amostra do solo.

### **3. Gradiente hidráulico**

O gradiente é gerado mediante a aplicação de um diferencial de pressão entre o topo e a base da amostra. A pressão aplicada na base é maior do que no topo, de modo que se estabelece um fluxo na direção ascendente no corpo de prova o qual evita a formação de caminhos preferencias e facilita a remoção das bolhas de ar localizadas na amostra.

### **4. Carga constante**

O método de ensaio para a medição da condutividade hidráulica no equipamento é o de carga constante. Neste método o gradiente é imposto e mantido constante, e a quantidade de fluxo percolado na amostra é medida. Este método tem como vantagens, sua simplicidade no seu cálculo e execução.

### **5. Contrapressão**

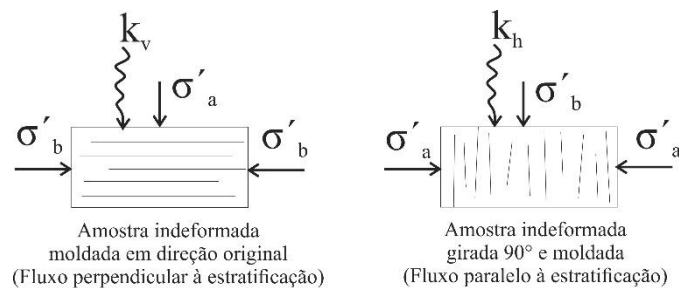
O tempo de execução do ensaio tende a ser reduzido devido a que utilização da contrapressão permite saturar o corpo de prova de forma mais rápida. Esta contrapressão é realizada por meio da aplicação de uma pressão de igual valor na base e topo da amostra. Adicionalmente, a saturação da amostra é confirmada com o cálculo do parâmetro B de Skempton.

### **6. Transdutores de pressão e sistema de aquisição de dados**

O equipamento conta com três transdutores de pressão, dois para a medição da pressão na base e no topo da amostra de solo, e outro para a medição da pressão confinante. A utilização destes transdutores, junto com o sistema de aquisição de dados, possibilitam a avaliação do parâmetro B de Skempton, além de medições das pressões impostas no equipamento com maior acurácia e precisão.

### **7. Aplicação de tensão desviadora**

Uma prensa de carregamento foi adicionada ao projeto do permeâmetro com a finalidade de aplicar uma tensão desviadora na amostra de solo. Esta tensão desviadora permite a realização de medições da condutividade hidráulica para diferentes condições de carga e fluxo no corpo de prova (Figura 4.1).



Condições de carga	Permeabilidade mensurável	
	$k_v$	$k_h$
$\sigma'_a = \sigma'_b$	Sim	Sim
$\sigma'_b > \sigma'_a$	Não	Sim
$\sigma'_a > \sigma'_b$	Sim	Não

**Figura 4.1. Possíveis condições de carga e fluxo.**

## 8. Tamanho da amostra

O tamanho de amostra projetado para o permeâmetro desenvolvido, tem maior representatividade das condições de campo, devido ao fato que suas dimensões, em relação a seu diâmetro (130 mm), são maiores do que as utilizadas em ensaios convencionais. Por outro lado, sua menor altura (55 mm) permite que o tempo de duração do ensaio seja reduzido, já que o caminho que a água tem que percorrer é menor. Porém, no equipamento também é possível fazer ensaios com amostras de diferentes dimensões, isto porque a base e o pedestal são peças intercambiáveis.

- **Características das amostras ensaiadas no equipamento**

### 1. Amostras indeformadas ou compactadas

No permeâmetro é possível a realização de ensaios com amostras tanto compactadas como indeformadas. Isto porque projetou-se para a compactação e moldagem delas, uma peça que permitisse a sua obtenção de maneira simples, do tamanho projetado do corpo de prova. Esta peça será detalhada no item 4.3.5.

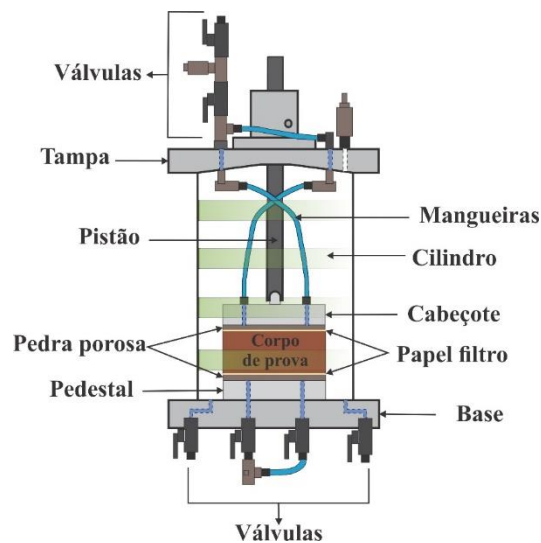
### 2. Ensaios de permeabilidade com diferentes materiais

O equipamento desenvolvido permite fazer ensaios com corpos de prova de diferentes materiais, alguns desses podem ser: misturas de concreto e argamassa recentemente misturadas, pavimento asfáltico, e solo com borracha triturada.

## 4.2 PROJETO

O projeto do permeâmetro consistiu primeiro na identificação de todos os componentes necessários para o seu funcionamento. Inicialmente foram projetadas as conexões das linhas de pressão de ar e água, para o qual se fez a identificação tanto do local de posicionamento do permeâmetro como do sistema de fornecimento de ar comprimido e da água, que se encontram estabelecidos no laboratório da Geotecnia da pós-graduação. Finalmente, com essas informações se fez o projeto do permeâmetro, definindo todas as peças, conexões e linhas de pressão de ar e água necessários para o funcionamento do sistema.

O equipamento desenvolvido tem uma câmara de acrílico (Figura 4.2), na qual a amostra de solo é posicionada com o auxílio de um pedestal e um cabeçote, usinados em alumínio. Tem duas pedras porosas, papel filtro, membrana de látex, pistão e um sistema de válvulas interconectadas por meio de conexões e mangueiras, que permite levar a pressão da água por todo o equipamento, a câmara apresenta dupla drenagem no cabeçote e no pedestal tem como finalidade facilitar a saturação do sistema e das pedras porosas.

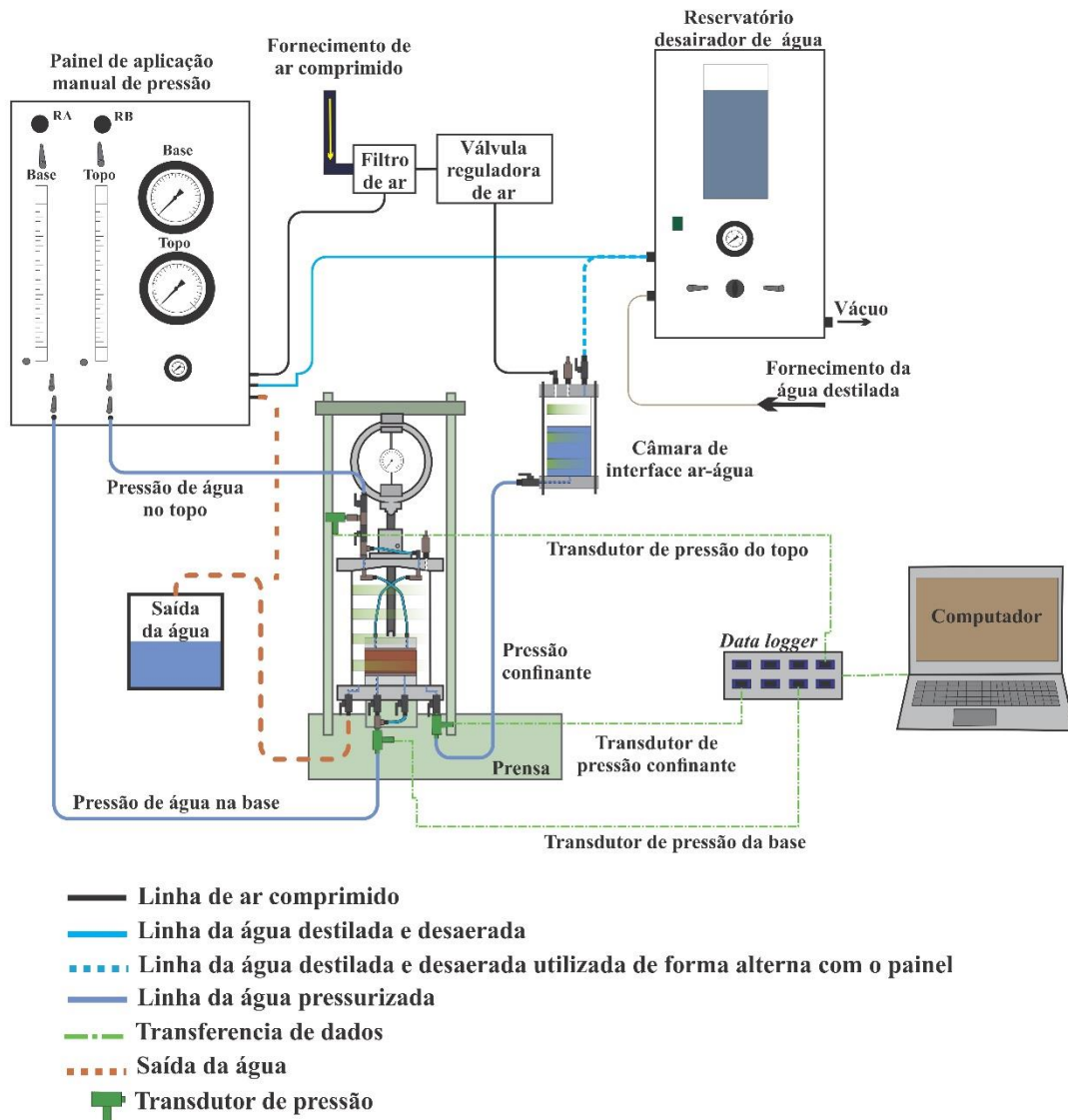


**Figura 4.2. Detalhe da câmara do permeâmetro.**

Um diagrama esquemático do permeâmetro dos diversos componentes e do funcionamento do sistema é apresentado na Figura 4.3. Do laboratório de geotecnia disponibilizou-se para o permeâmetro, um painel de aplicação manual de pressão, uma prensa de carregamento com anel dinamométrico e um reservatório de água deaerada. O painel é utilizado para a aplicação da contrapressão na amostra (base e topo), a prensa para a aplicação de carregamento no corpo de prova, e o reservatório para fornecimento da água do sistema. O permeâmetro tem uma câmara de interface ar-água para a aplicação da pressão confinante, um



recipiente para a saída da água, transdutores de pressão, sistema de aquisição de dados e computador. As linhas de contrapressão são controladas pelos reguladores RA e RB, do painel de aplicação manual de pressão, as quais são monitoradas com dois transdutores de pressão. A linha de pressão confinante é monitorada com um transdutor de pressão e controlada com uma válvula reguladora de ar. Os transdutores de pressão estão todos conectados ao *datalogger* e os dados obtidos do ensaio são armazenados no computador.



**Figura 4.3. Diagrama esquemático do permeômetro de parede flexível e carga constante**

Com a finalidade de obter resultados mais representativos, decidiu-se projetar o permeômetro com um tamanho de amostra maior aos convencionalmente utilizados em ensaios de laboratório. O tamanho escolhido é o mesmo utilizado por Rodríguez (1996), onde a amostra

apresenta um diâmetro de 130 mm e uma altura de 55 mm. Este tamanho de amostra permite obter maior representatividade das condições do solo no campo e num menor tempo de ensaio, devido a que a amostra apresenta menor altura e, conseqüentemente, menor distância percorrida pela água. Levando isso em consideração, todas as peças do permeâmetro de parede flexível e carga constante, foram projetadas para esse tamanho de amostra. Em total, se fizeram 13 pranchas das peças utilizadas no permeâmetro (Apêndice A), nelas se detalham as dimensões e o material no que foram fabricadas as peças.

### 4.3 CONSTRUÇÃO E DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO

Neste item é descrito o procedimento para a construção do permeâmetro e são detalhadas as partes que o compõem, especificando cada uma das suas funções e características. Para maior facilidade na descrição do funcionamento do permeâmetro, suas partes foram agrupadas em: i) câmara do permeâmetro; ii) sistema de aplicação de pressão confinante; iii) sistema de aplicação de contrapressão; iv) sistema de medição das pressões e aquisição de dados e v) aparelhagem geral. Na Figura 4.4 apresenta-se um diagrama com a agrupação mencionada.

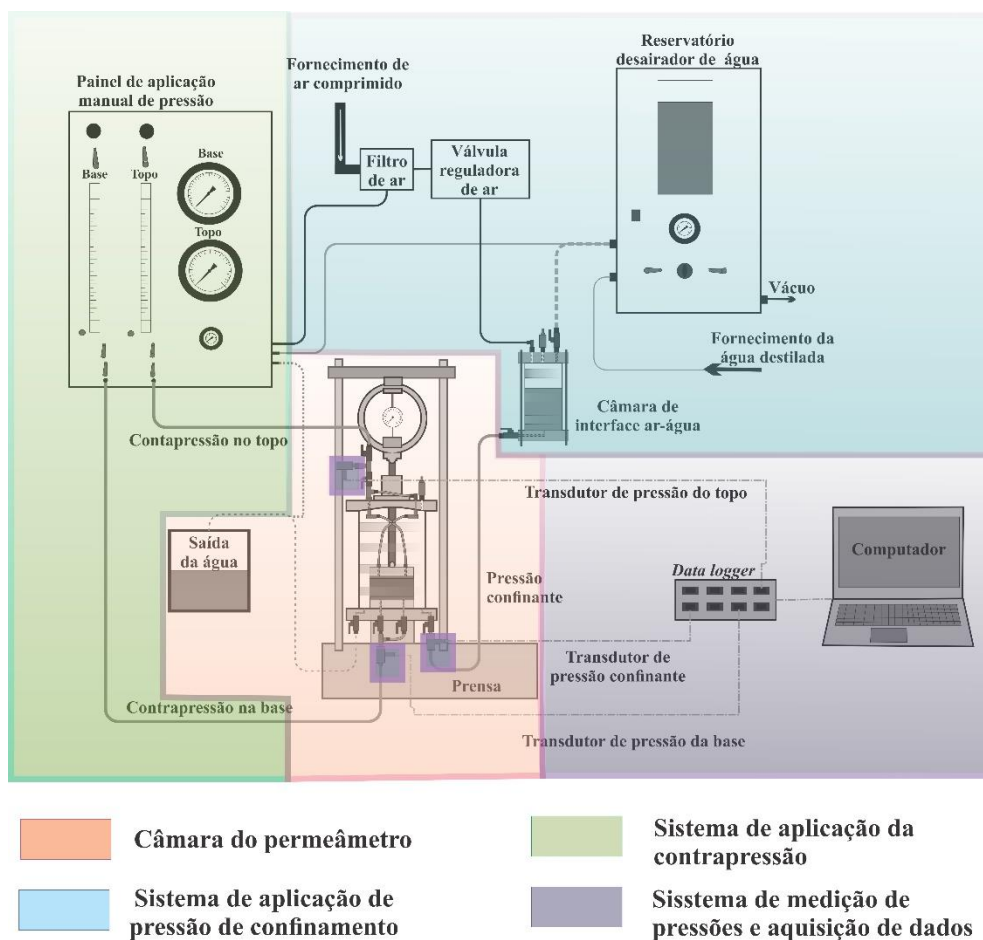


Figura 4.4. Agrupação das partes do permeâmetro de parede flexível e carga constante.

Para a construção do permeâmetro, foram disponibilizadas algumas peças do laboratório da Geotecnia da Pós-graduação, mas de acordo com às especificações do equipamento, se tiveram que fazer modificações em algumas delas. Estas modificações, assim como a usinagem das peças complementares, foram realizadas por parte do Laboratório de Processos de Fabricação, do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Na Tabela 4.1 apresentam-se todas as peças necessárias para a construção do equipamento, onde se diferencia as disponibilizadas no laboratório, as modificadas e usinadas, e as compradas. A seguir são descritas cada uma das partes do equipamento de acordo à agrupação mencionada anteriormente.

**Tabela 4.1. Peças necessárias para a construção do equipamento.**

	<b>Item</b>	<b>Disponibilidade no laboratório</b>	<b>Condição</b>
<b>Câmara do permeâmetro</b>	Cilindro de acrílico para câmara do permeâmetro	Sim	Disponível
	Base câmara do permeâmetro	Sim	Disponível
	Tampa câmara do permeâmetro	Sim	Modificação
	Hastes rosqueadas para fixação da câmara do permeâmetro	Sim	Modificação
	Pedestal	Não	Fabricação
	Cabeçote	Não	Fabricação
	Pedra Porosa (Diâmetro 130 mm)	Não	Compra
	Papel Filtro (Diâmetro 130 mm)	Não	Compra
	O' rings	Não	Compra
	Membrana Flexível (Diâmetro 130 mm)	Não	Compra
	Prensa de carregamento	Sim	Disponível
	Anel dinamométrico	Sim	Disponível
	Pistão	Não	Fabricação
	Extensômetro	Sim	Disponível
Peça para engate do defletômetro no pistão	Não	Fabricação	
<b>Sistema de aplicação de pressão confinante</b>	Cilindro de acrílico para câmara de interface ar-água	Sim	Disponível
	Base da câmara de interface	Não	Fabricação
	Tampa da câmara de interface	Não	Fabricação
	Hastes rosqueadas para fixação da câmara de interface	Não	Fabricação
	Filtro de ar	Não	Compra
	Válvula reguladora de ar	Não	Compra
<b>Sistema de aplicação da contrapressão</b>	Reservatório para água	Sim	Disponível
	Painel de aplicação manual de pressões	Sim	Disponível
<b>Sistema de medição das pressões e aquisição de dados</b>	Conexões: painel-câmara triaxial / reservatório câmara interface	Não	Fabricação
	Transdutor para pressão confinante	Não	Compra
	Transdutores para medição da contrapressão	Sim	Disponível
	<i>Data logger</i>	Sim	Disponível
	Computador	Sim	Disponível

	<b>Item</b>	<b>Disponibilidade no laboratório</b>	<b>Condição</b>
<b>Aparelhagem geral</b>	Cilindros para compactação e moldagem de amostras inalteradas (diâmetro interno 130 mm)	Não	Fabricação
	Base de alumínio para extração da amostra inalterada (diâmetro 130 mm)	Não	Fabricação
	Placa Compactação	Sim	Disponível
	Conexões em latão	Não	Compra
	Conexões instantâneas	Não	Compra
	Mangueiras	Não	Compra
	Válvulas	Sim	Disponível

### 4.3.1 Câmara do permeâmetro

Na Figura 4.5 apresenta-se o detalhamento da câmara do permeâmetro, assim como de sua tampa e base. A câmara do permeâmetro tem capacidade de até 1.700 kPa, é similar as câmaras de ensaios triaxiais somente que com maior tamanho. Está composta por um cilindro de acrílico selado por uma tampa e uma base de aço inoxidável, conta com seis hastes rosqueadas que garantem a união da tampa, o cilindro e a base. A câmara é preenchida com água deaerada e destilada fornecida pelo reservatório, e logo é aplicada a pressão confinante por meio da câmara de interface.

Na parte superior da câmara se tem duas conexões que permitem o passo da contrapressão superior para a amostra de solo, além de uma válvula de ventilação (para aliviar pressões), e um tampão que permite assegurar o preenchimento completo da câmara com água deaerada e destilada.

A base da câmara conta com quatro válvulas: duas para o controle da contrapressão inferior e o fluxo da água, uma para o controle da pressão confinante e a última para a saída da água no momento do desmonte do ensaio.

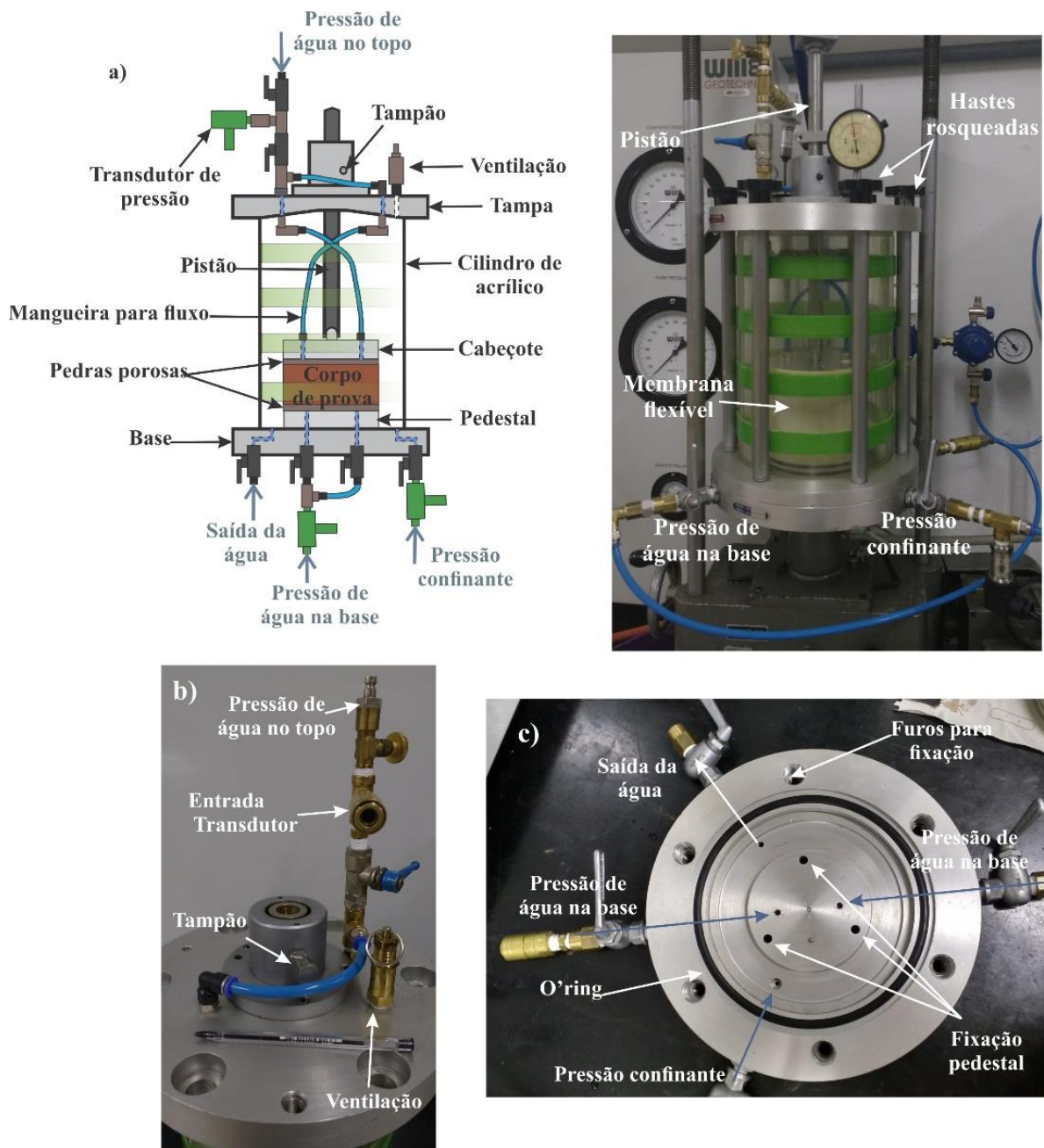
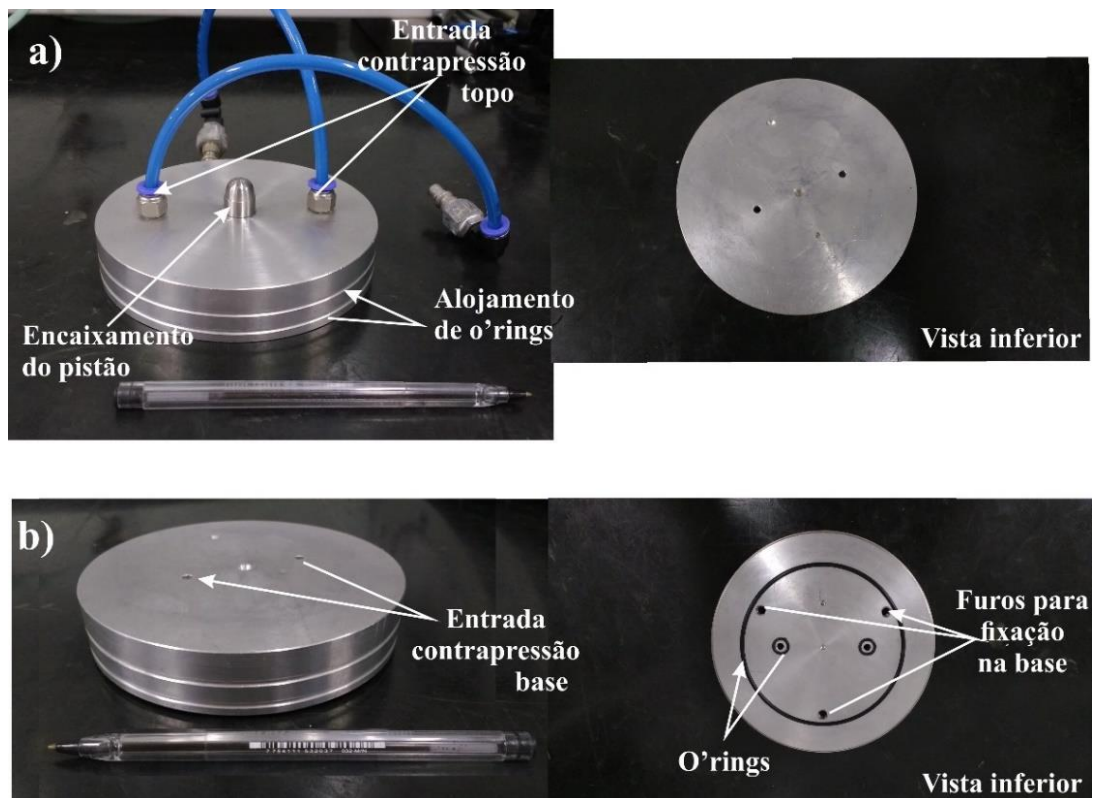


Figura 4.5. Detalhes da a) câmara do permeâmetro, b) da tampa e c) da base.

- **Pedestal e cabeçote**

O pedestal e cabeçote atuam como elemento de passagem do fluido percolante através da amostra de solo, ajudam a posicionar adequadamente o corpo de prova e a auxiliar na vedação, servindo de apoio aos *o' rings*. Estas peças tem o mesmo diâmetro que a amostra de solo (130 mm), e foram usinadas em alumínio pelo laboratório de Processos de Fabricação (ENM/FT).

O pedestal ajuda a impedir movimentos laterais ou inclinações da amostra (ABNT, 2000), e o cabeçote tem um pino ovalado de aço inoxidável para o encaixamento do pistão. Além disso, tem duas mangueiras de poliuretano de 6 mm de diâmetro para a sua conexão com a tampa da câmara. Estas duas peças tem drenagem dupla, com a finalidade de facilitar a saturação das pedras porosas e as linhas de drenagem (Dourado, 2003). Na Figura 4.6 se apresentam o cabeçote e o pedestal, e no Apêndice A as pranchas com os detalhamentos de suas dimensões.



**Figura 4.6. Detalhes do cabeçote (a) e pedestal (b).**

- **Pedras porosas e papel filtro**

As pedras porosas facilitam a drenagem e permitem a dissipação das poropressões geradas pelo confinamento, esta dissipação também se dá pelas conexões que permitem a saída ou entrada de água. As pedras têm alta permeabilidade, são planas e isentas de trincas, avarias, e desuniformidades, sua espessura é de 8 mm e tanto o diâmetro delas como do papel filtro são iguais ao corpo de prova (Figura 4.7).



O papel filtro tem como função evitar a intrusão de material nos poros das pedras porosas e no equipamento, além de facilitar a remoção da amostra depois do ensaio. O papel filtro utilizado tem uma gramatura de 80 g/m<sup>2</sup>.

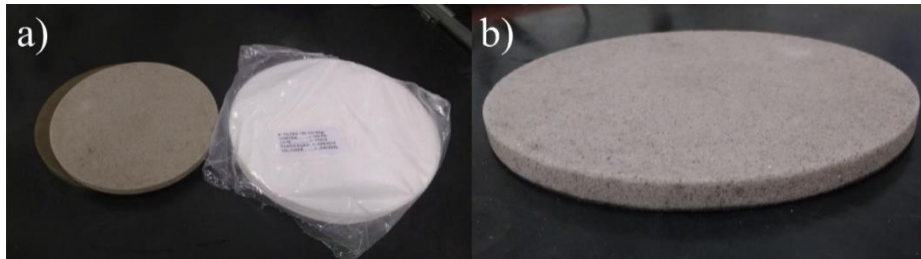


Figura 4.7. a) Pedra porosa e papel filtro. b) Detalhe da pedra porosa.

- **Membrana flexível**

A membrana flexível tem como função separar a pressão exercida na câmara, da poropressão da amostra, além da minimização dos fluxos laterais. A membrana é de látex, com diâmetro igual a 130 mm e encontra-se isenta de defeitos ou perturbações.

A membrana é colocada em torno à amostra, a vedação é realizada com *o' rings* colocados no pedestal e no cabeçote (Figura 4.8). Estes *o' rings*, de acordo à norma ABNT (2000), devem ter medidas, quando não tensionados, menores do que 90% do diâmetro do pedestal e do cabeçote, portanto o diâmetro dos *o' rings* utilizados nestas peças é de 115 mm.

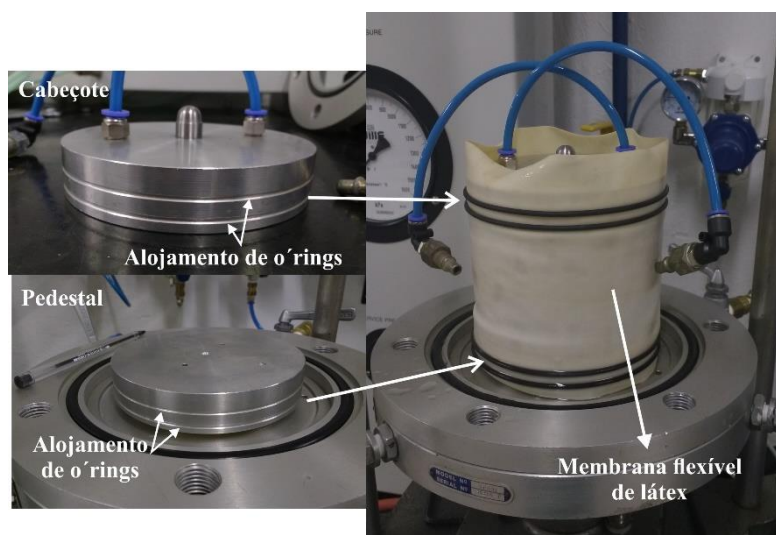
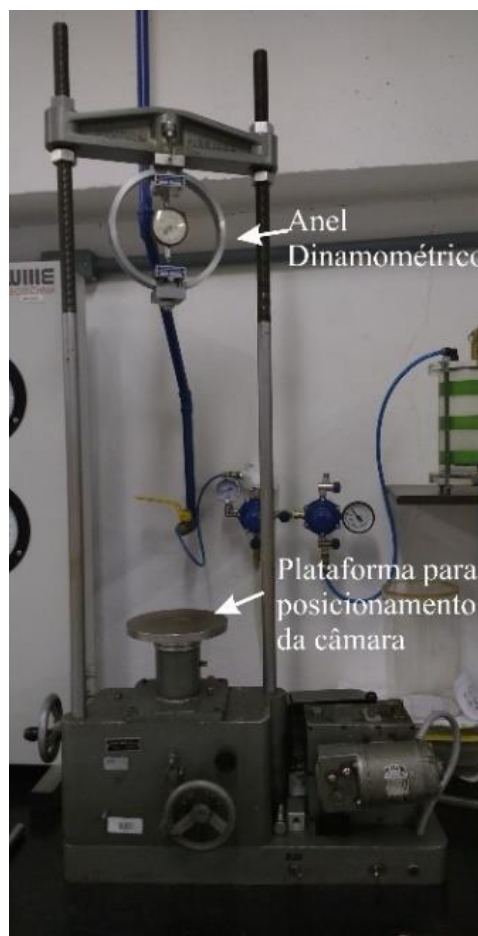


Figura 4.8. Vedação da membrana com o' rings.

- **Prensa e anel dinamométrico**

Foi providenciada uma prensa de aplicação manual e mecânica de carga (Figura 4.9), a qual foi consertada e adaptada para o posicionamento da câmara do permeâmetro. Conta com um anel dinamométrico com capacidade de 10 kN.

Com esta prensa pode-se aplicar carregamento vertical sobre a amostra, o que permite ter a possibilidade de submeter ao solo a condições mais próximas do seu estado de tensões no local, e diferentes condições de carga e fluxo.



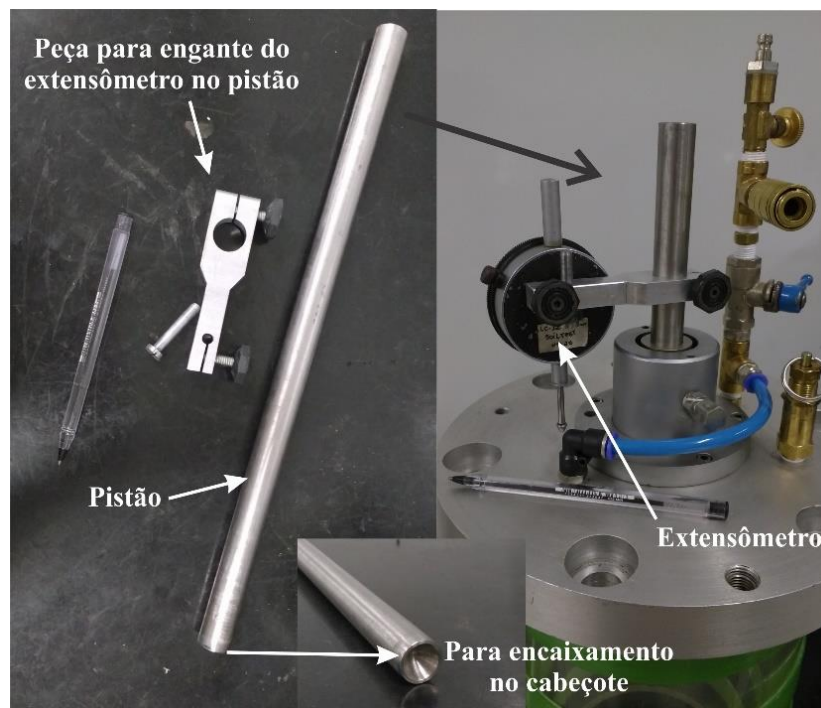
**Figura 4.9. Prensa de carregamento.**

- **Sistema pistão defletômetro**

Para a aplicação do carregamento vertical ao solo através do cabeçote e para o monitoramento da altura do corpo de prova se adicionou à câmara do permeâmetro um pistão e um extensômetro. O pistão foi usinado de aço inoxidável e a peça para engate do extensômetro no pistão, foi usinada em alumínio. As extremidades superior e inferior do pistão foram



projetadas para o encaixe no cabeçote e no anel dinamométrico. Apresenta-se na Figura 4.10 estas duas peças, e no Apêndice A a prancha com os detalhamentos da suas dimensões.

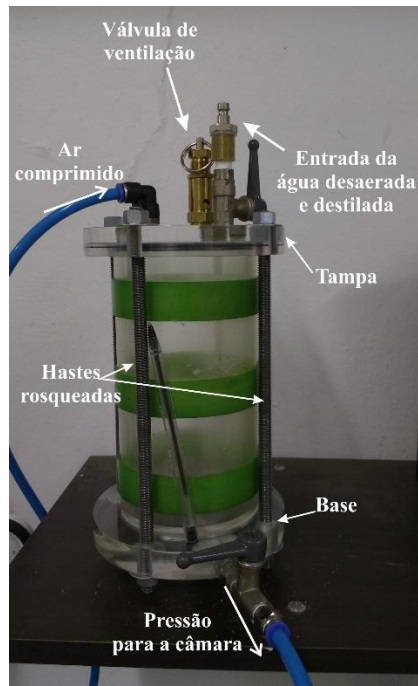


**Figura 4.10. Detalhes do pistão e a peça para engaste do extensômetro no pistão.**

#### **4.3.2 Sistema de aplicação de pressão confinante**

Para aplicação da pressão de confinamento foi construída uma câmara de interface ar-água (Figura 4.11). Para sua construção se utilizou um cilindro de acrílico, semelhante ao utilizado na câmara do permeômetro, que estava disponível no laboratório. A tampa e a base da câmara de interface foram usinadas em acrílico, pelo laboratório de Processos de Fabricação. Para a fixação do topo, cilindro e base, foram utilizadas quatro hastes rosqueadas com porcas e arruelas.

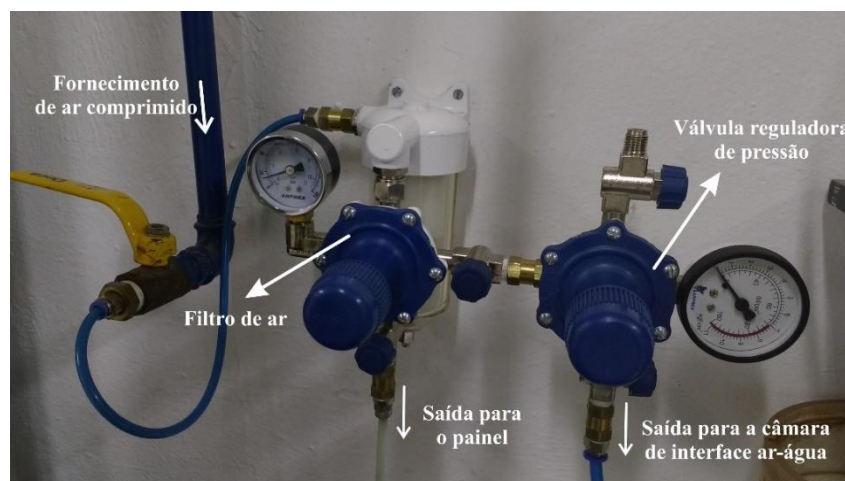
A tampa da câmara de interface ar-água, tem uma válvula de ventilação, uma entrada para o enchimento com água deaerada e destilada, e outra entrada para o ar comprimido. Na base da câmara de interface se tem uma válvula para o controle da saída da água pressurizada à câmara do permeômetro.



**Figura 4.11. Detalhes da câmara de interface ar-água.**

- **Fornecimento de ar comprimido**

O fornecimento de ar comprimido do sistema do permeâmetro (Figura 4.12), conta com um filtro de ar com capacidade de até 11 bar (1100 kPa), que regula o ar e permite a eliminação da água, o excesso de umidade e de impurezas que possam prejudicar o equipamento e a qualidade do ar. O filtro tem duas saídas, uma para o painel, e uma para a válvula reguladora de pressão da câmara de interface, que tem capacidade de até 11kgf/cm<sup>2</sup> (1079 kPa) que serve para o controle do ar que ingressa na câmara. É importante esclarecer, que o compressor de ar que alimenta todo o sistema de ar do laboratório tem capacidade de 8 bar (800kPa).



**Figura 4.12. Fornecimento de ar comprimido.**

- **Reservatório de água**

Para o fornecimento de água, disponibilizou-se de um reservatório de água deaerada (Figura 4.13). O reservatório tem capacidade de aproximadamente 20 litros, e compreende de um coletor de água, sistema de válvulas, vácuo, medidor de vácuo e mangueiras para enchimento e saída da água. Adicionalmente, tem um conector que permite utilizar a bomba de vácuo em separado.



**Figura 4.13. Reservatório de água deaerada.**

### **4.3.3 Sistema de aplicação da contrapressão**

Para a aplicação da contrapressão na amostra de solo, foi providenciado do laboratório da geotecnia um painel de aplicação manual de pressão, com capacidade de até 1.600 kPa (Figura 4.14). O painel tem duas buretas, uma de 100 ml e outra de 50 ml, um sistema para preencher e esvaziar as buretas, dois reguladores e manômetros para o controle da pressão superior e inferior, e um manômetro adicional para a pressão de alimentação. O painel conta com três conexões na parte lateral para o fornecimento de ar comprimido, da água deaerada e destilada e para a saída de água. É conectado ao reservatório por meio de conexões de engate rápido.

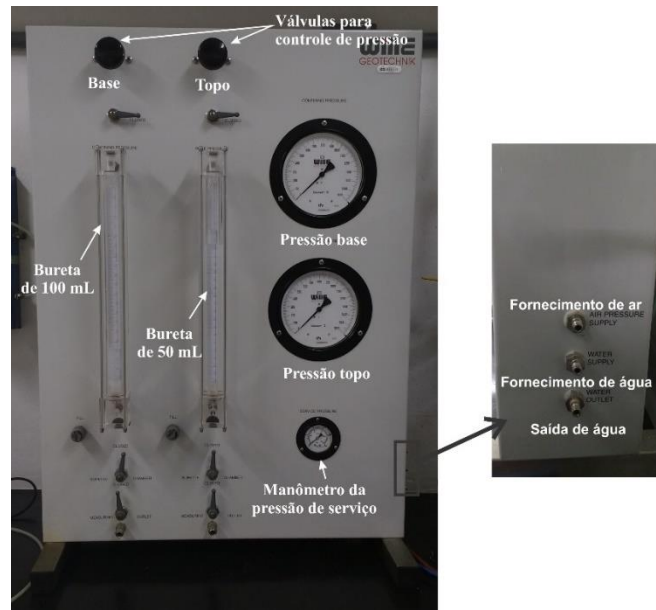


Figura 4.14. Painel de aplicação manual de pressão.

#### 4.3.4 Sistema de medição das pressões e aquisição de dados

Para a medição do  $B$  de Skempton durante o processo de saturação e para um controle mais preciso das pressões de contrapressão, confinante e de carga hidráulica se instalaram três transdutores. O permeâmetro conta também com um *data logger* e um computador para a leitura e armazenamento dos dados. Os transdutores empregados e o *data logger* são descritos a seguir.

- **Transdutor para medição da pressão confinante**

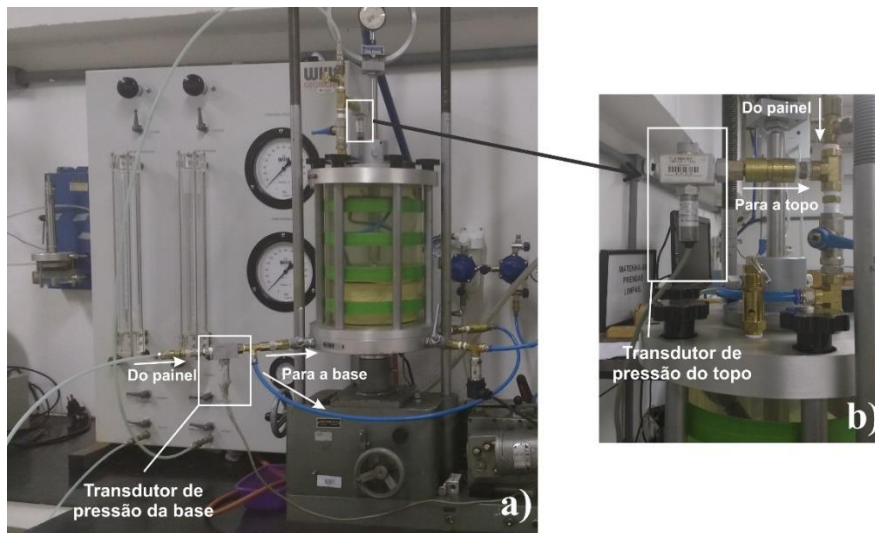
O transdutor de pressão utilizado para a pressão confinante tem capacidade de 1.000 kPa e precisão de 1 kPa (Figura 4.15).



Figura 4.15. Transdutor para medição da pressão confinante.

- **Transdutores de pressão para a medição da poropressão, contrapressão e carga hidráulica**

Foram instalados dois transdutores de pressão para a medição da poropressão, contrapressão e carga hidráulica, na base e no topo da câmara (Figura 4.16), com capacidade de 700 kPa.



**Figura 4.16. a) Transdutor da base e topo da amostra, b) detalhe transdutor do topo.**

- **Sistema de aquisição de dados**

Para a aquisição de dados foi utilizado um *data logger* como o mostrado na Figura 4.17. O aquisitor tem entradas universais que permitem a medição de uma ampla gama de diferentes magnitudes, como pressões, deformações, forças, deslocamentos, temperaturas, etc. O *data logger* conta com oito canais, tem alta precisão e pode ser conectado ao computador via *Ethernet*.

Para armazenamento de dados se tem o software próprio do *data logger*, o qual permite o armazenamento de até 5 milhões de valores de medição por segundo, a visualização das medições em tempo real e a análise dos sinais em paralelo. O programa é de fácil integração com os transdutores e sua configuração é rápida, os dados obtidos podem ser exportados em muitos formatos, como no ASCII.





**Figura 4.17. Sistema de aquisição de dados.**

Foi necessária fazer a adaptação da conexão do cabo dos transdutores de pressão para a conexão do *data logger*, além da calibração deles. Esta calibração foi realizada com um equipamento controlador de pressão e volume (Figura 4.18). Este equipamento permite o controle de água sob pressão e medida de variação do volume, tem pressão máxima de 1.000 kPa, não requer para seu funcionamento uma fonte de ar comprimido e pode ser uma fonte de pressão constante. Para a calibração dos transdutores se fizeram três leituras tanto para carregamento como para descarregamento, as leituras foram realizadas com o *data logger* e as curvas de calibração obtidas são apresentadas no Apêndice D.



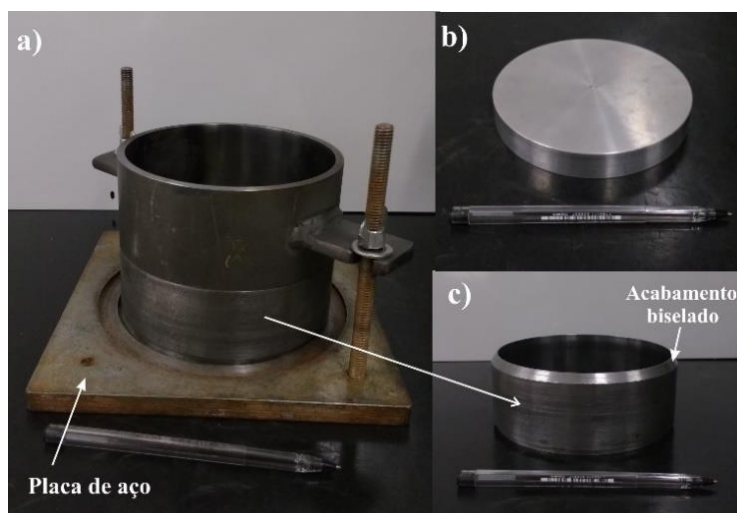
**Figura 4.18. Equipamento controlador de pressão e volume GDS.**

#### **4.3.5 Aparelhagem geral**

Elementos necessários para realização do ensaio como paquímetro, balanças, equipamento para talhagem de corpos de prova indeformados e extrator de amostras se encontravam disponíveis no laboratório.

Para a moldagem de amostras indeformadas ou compactadas de 130 mm de diâmetro e 50 mm de altura, se projetou um molde de aço inoxidável especialmente para o permeâmetro

(Figura 4.19). O molde está composto por quatro partes: dois cilindros usinados em aço trefilado e brunido internamente, com diâmetro interno de 130 mm; uma base de alumínio para a extração da amostra do cilindro; e uma placa de aço com dois hastes rosqueadas com porcas e arruelas para a fixação no momento da compactação. Esta última peça foi disponibilizada por o laboratório da geotecnia. Um dos cilindros tem acabamento biselado que ajuda na moldagem das amostras de solo indeformadas. Apresenta-se no Apêndice A a prancha com os detalhamentos da suas dimensões.



**Figura 4.19. a) Peça para compactação e moldagem de amostras, b) base para extração das amostras do tubo c) peça com acabamento biselado.**

#### 4.3.6 Especificações técnicas

As especificações técnicas dos componentes do equipamento são apresentadas na Tabela 4.2, na qual são detalhadas, conforme corresponda, sua capacidade, precisão e características principais.

**Tabela 4.2. Resumo especificações técnicas dos componentes do permeâmetro.**

	Item	Capacidade	Precisão	Características
Câmara do permeâmetro	Câmara do permeâmetro	1700 kPa	-	Composta de um cilindro de acrílico selado por tampa e base de aço inoxidável, tem seis hastes para fixação.
	Pedestal	-	-	Peça de alumínio com diâmetro de 130 mm. Tem dupla drenagem para facilitar a saturação do sistema (linhas de drenagem, conexões e válvulas) e das pedras porosas.
	Cabeçote	-	-	Peça de alumínio com diâmetro de 130 mm. Tem dupla drenagem para facilitar a saturação do sistema (linhas de drenagem, conexões e válvulas) e das pedras porosas. Tem um pino ovalado de aço inoxidável, para seu encaixe com o pistão.

Item		Capacidade	Precisão	Características	
<b>Câmara do permeâmetro</b>	Pedra Porosa		-	-	Pedra de alta permeabilidade, com diâmetro de 130 mm e espessura de 8 mm
	Papel Filtro		-	-	Papel filtro do tipo qualitativo e com gramatura de 80 g/m <sup>2</sup> . Tem um diâmetro de 130 mm.
	O'rings		-	-	Anéis para vedação de Borracha Nitrílica (NBR).
	Membrana Flexível		-	-	Membrana de látex, com diâmetro de 130 mm e altura de 200 mm.
	Prensa de carregamento	Anel dinamométrico	10 kN	-	Anel de aço endurecido especial.
		Extensômetro	10 mm	0,01 mm	-
Sistema pistão-extensômetro	Pistão	-	-	Usinado em aço inoxidável, suas extremidades estão projetadas para seu encaixe com o cabeçote e o anel dinamométrico.	
	Extensômetro	25 mm	0,01mm	Conta com uma peça usinada em alumínio para seu engate com o pistão.	
<b>Sistema de aplicação de pressão confinante</b>	Câmara de interface ar-água		1000 kPa	-	Câmara de acrílico
	Filtro de ar		1100 kPa	20 kPa	Eliminação de água e excesso de umidade, regula a saída de ar, mantendo a pressão e vazão constante.
	Válvula reguladora de pressão confinante		1079 kPa	25 kPa	Válvula para o controle da pressão e vazão.
	Reservatório de água deaerada	Reservatório	20 litros	-	Comprimento: 420 mm, Largura: 410 mm, Altura: 750 mm, Peso: 35 kg. Reservatório fabricado em <i>plexiglass</i> , com 3 conexões. Bomba de vácuo (230 V; 50 Hz; 0,170 kW; 0,85 A), capacidade da bomba 22 l/min, peso: 5,8 kg.
Bomba de Vácuo		20 mbar	-		
<b>Sistema de aplicação da contrapressão</b>	Painel de aplicação manual de pressões	Manômetro Base	1600 kPa	10 kPa	Altura: 990 mm, Largura: 700 mm, Peso: 37,5 kg Comprimento das buretas de 400 mm Dispositivo de precisão com alta constância para regular excesso de pressão, e com dispositivo de segurança de pressão.
		Manômetro Topo		10 kPa	
		Manômetro serviço		50 kPa	
		Bureta Base	100 ml	0,5 ml	
		Bureta Topo	50 ml	0,2 ml	
<b>Sistema de medição das pressões e aquisição de dados</b>	Transdutor para pressão confinante		1000 kPa	1 kPa	Sensor tipo corrente. Entrada: 10 – 30 Vdc. Sinal de saída: 4 - 20 mA.
	Transdutores para medição da contrapressão	Transdutor Base	700 kPa	1 kPa	Sensor tipo tensão. Entrada: 10 Vdc. Sinal de saída: 0 - 100 mV
		Transdutor Topo		1 kPa	



Item		Capacidade	Precisão	Características	
Sistema de medição das pressões e aquisição de dados	<i>Data logger</i>		Entradas universais até 8 canais	-	Entradas universais com resolução de 24 bits; capacidade em tempo real (álgebra, matriz controle PID, valores limite, análise de vibração de torção, gerador de sinal); entradas e saídas digitais; amplificador de medição 8/4 canais, taxa de amostragem por canal de 40 kS/s; Largura da banda de sinal de 7,2 kHz; sincronização via Ethernet ou FireWire; conexão DSubHD de 15 pinos. Tecnologias do sensor: i) Ponte inteira piezoresistiva; ii) 1/2 ou ponte inteira indutiva, LVDT; iii) tensão (+-100mV, +-10 V e +-60 V); iv) corrente padronizada (+-20 mA).
	Aparelhagem geral	Mangueiras	Diâmetro Externo 8mm, Int. 5,5 mm	1000 kPa	-
Diâmetro Externo 6mm, Int. 4 mm			-		Mangueira de poliuretano para conexão de engate rápido, com raio de curva de 20 mm
Válvulas de latão		4000 kPa	-	Válvulas de latão niquelado, com temperaturas de trabalho entre -20°C e 80°C.	
Válvulas de Aço		2000 kPa	-	Válvula de aço, rosca 3/8" NPT	
Válvula de ventilação		1200 kPa	-	Válvula de latão, equipamento automático para alívio de pressão, vedação de borracha nitrilíca NBR, rosca 1/4" NPT	

### 5 INSTRUMENTAÇÃO E OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Neste capítulo apresenta-se a etapa três e quatro propostas na metodologia, estas etapas tem como objetivo provar o funcionamento do equipamento e solucionar os problemas ocorridos durante sua operação. Esta etapa consistiu em: 1) definição dos procedimentos prévios que devem ser feitos antes da realização dos ensaios no equipamento; 2) descrição do material utilizado para o ensaio e do processo para a moldagem da amostra de solo indeformada 3) descrição detalhada do procedimento de ensaio de condutividade hidráulica; e 4) apresentação dos resultados obtidos.

#### 5.1 PROCEDIMENTOS PRÉVIOS

Antes de começar com a operação do equipamento, foi necessário realizar o controle dos possíveis vazamentos que poderiam ter as conexões e válvulas utilizadas no permeâmetro. Para isto foram aplicadas pressões nas linhas de água e ar do sistema, em estágios crescentes de 50 kPa, até chegar a 650 kPa. Este procedimento foi realizado até não se detectar mais vazamentos no sistema. Ao painel de aplicação manual de contrapressão, realizou-se uma manutenção geral, que consistiu na lavagem das mangueiras e buretas, as quais podem ser retiradas do painel, sempre tomando o cuidado no momento de desmonte.

Como foi mencionado anteriormente, foram feitas as respectivas calibrações dos transdutores de pressão, para isto foi necessária sua conexão a umas válvulas (Figura 5.1), que permitiram sua saturação. Logo foi feita a aplicação das pressões com o equipamento GDS, primeiro em estágios de 10 kPa até 50 kPa e logo em estágios de 50 kPa até chegar a 600 kPa. Para a calibração de cada um dos transdutores foram tomadas três leituras em carregamento e descarregamento as quais são apresentadas no Apêndice B.



**Figura 5.1. Conexão realizada para a calibração dos transdutores.**

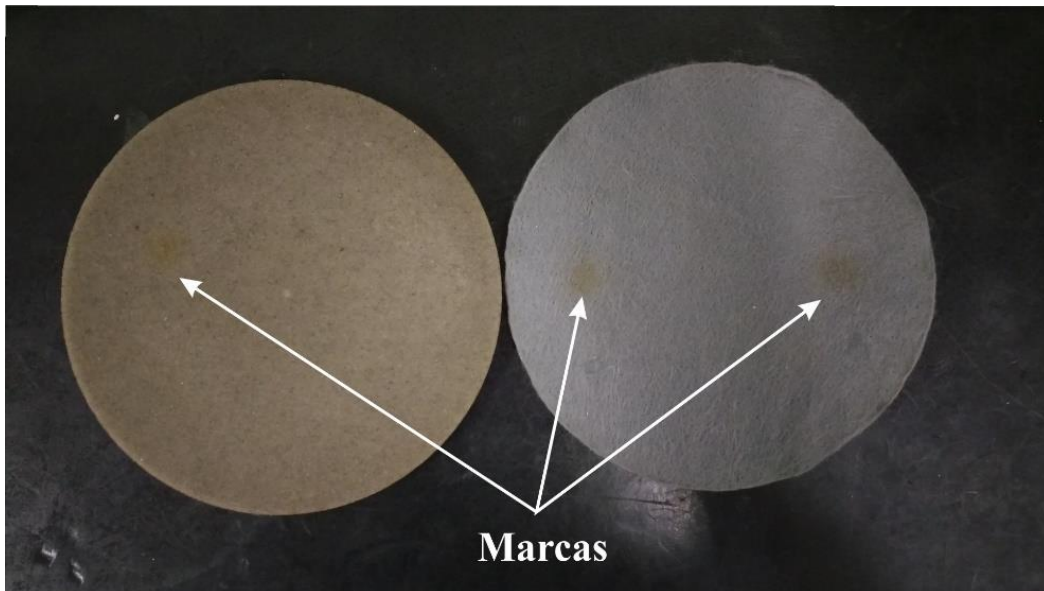
## 5.2 SATURAÇÃO DO SISTEMA

Esta fase do ensaio, como seu nome o indica consistiu na saturação do sistema (linhas de drenagem, conexões, válvulas) e das pedras porosas, com a finalidade de garantir que a perda de carga ocorrerá apenas na amostra de solo. Para isto se realizou um ensaio somente com as pedras porosas, seguindo os passos descritos a continuação:

1. Preenche-se o reservatório com água destilada, segundo as indicações do manual do reservatório.
2. Liga-se a tubulação do reservatório no painel de controle de pressão e preenchem-se as buretas com água destilada e deaerada.
3. Coloca-se a membrana de látex no pedestal a qual se fixa com dois *o' rings*, vira-se ela no redondo do cabeçote e em seguida colocam-se as duas pedras porosas e o cabeçote. Estende-se a membrana em torno das pedras porosas e fixa-se ao cabeçote com outros dois *o' rings*.
4. Coloca-se o tubo de acrílico e a tampa, com as mangueiras do cabeçote já conectadas. Por último ajusta-se o pistão.
5. Com os seis hastes de amarração fixam-se a tampa, o cilindro e a base da câmara do permeâmetro.
6. Preenche-se a câmara do permeâmetro com a diferença de nível entre o reservatório e o equipamento, e deixa-se sair algumas gotas de água para garantir o seu enchimento.
7. Realiza-se o ensaio, com o mesmo gradiente hidráulico usado no ensaio com amostra de solo.

Os resultados obtidos deste ensaio apresentaram condutividades hidráulicas muito baixas ( $k=10^{-8}$  cm/s) para as pedras porosas, de modo que se decidiu fazer o mesmo, utilizando um geotêxtil de poliéster com gramatura de 500 g/m<sup>2</sup>. Porém, com o geotêxtil, foram obtidas também valores de k baixos ( $k=10^{-6}$  cm/s). Ao fazer o desmonte do ensaio e inspecionar o geotêxtil foram percebidas neles umas marcas (Figura 5.2), possivelmente provocadas pela infiltração de água através dos orifícios do cabeçote e o pedestal (Figura 4.4). Estas marcas, que também se encontraram nas pedras porosas, deram para inferir que a água não estava sendo bem distribuída por estas peças e o fluxo só se desenvolveu na superfície das marcas e não pela

superfície total da pedras ou do geotêxtil. Levando isto em consideração se fizeram alguns canais tanto no cabeçote como no pedestal, que permitiram que a água fora distribuída de maneira mais uniforme. Estas modificações são apresentadas na Figura 5.3, e foram adicionadas nas pranchas correspondentes.



**Figura 5.2. Marcas na pedra porosa e o geotêxtil.**



**Figura 5.3. Modificações realizadas no cabeçote e o pedestal.**

### 5.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Neste tópico apresenta-se o procedimento para a realização do ensaio de condutividade hidráulica, o qual se baseou nas normas ABNT (1995, 2000); D5084-10-ASTM (2010) e nos procedimentos descritos por alguns autores que utilizaram em suas pesquisas um permeâmetro de parede flexível (Rodríguez, 1996; Dourado, 2003; Rosa, 2008; Silveira, 2008; Olandoski, 2013). Este procedimento foi dividido em cinco fases: i) montagem da amostra, ii) percolação, iii) saturação por contrapressão, iv) medição da condutividade hidráulica e v) desmonte do ensaio. É importante mencionar que os valores de pressão apresentados neste procedimento foram utilizados para a realização do ensaio de prova do equipamento, para aplicação em outros tipos de solo devem ser pesquisados os valores mais indicados a ser implementados.

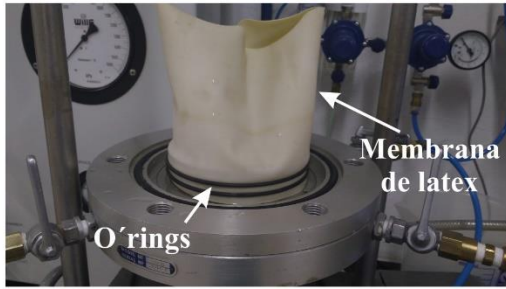
#### 5.3.1 Fase 1: montagem da amostra

Após da moldagem da amostra e de obter seus valores iniciais, procede-se a realizar sua montagem na câmara do permeâmetro, para isto se realiza o seguinte procedimento (Figura 5.4):

1. Deve-se verificar antes de começar a montagem da amostra, o fechamento de todas as válvulas e reguladores de pressão do sistema.
2. A montagem da amostra realiza-se com a base da câmara do permeâmetro posicionada sobre a prensa de carregamento.
3. Coloca-se a membrana de látex no pedestal e fixa-se com dois *o'rings*, vira-se ela em torno ao pedestal para posicionar a pedra porosa inferior, circula-se água pelo pedestal até observar que a água passa toda pela pedra porosa.
4. Coloca-se o conjunto; papel filtro inferior, amostra de solo, o papel filtro superior, e pedra porosa superior e cabeçote. Estende-se a membrana pela amostra, dobra-se suas extremidades em torno ao cabeçote e fixa-se com dois *o'rings*.
5. Coloca-se o cilindro de acrílico e a tampa da câmara do permeâmetro. Liga-se as mangueiras de drenagem do cabeçote às conexões correspondentes, situadas na tampa da câmara, isto tomando cuidado de não movimentar a amostra de solo. Por último situa-se o pistão.
6. Com as seis hastes de amarração fixa-se a tampa, o cilindro e a base da câmara do permeâmetro.

### Passo 3

a) Coloca-se a membrana no pedestal



b) Coloca-se a pedra e circula-se água nela



### Passo 4

a) Coloca-se um papel filtro e o corpo de prova



b) Coloca-se um papel filtro, a pedra porosa e o cabeçote



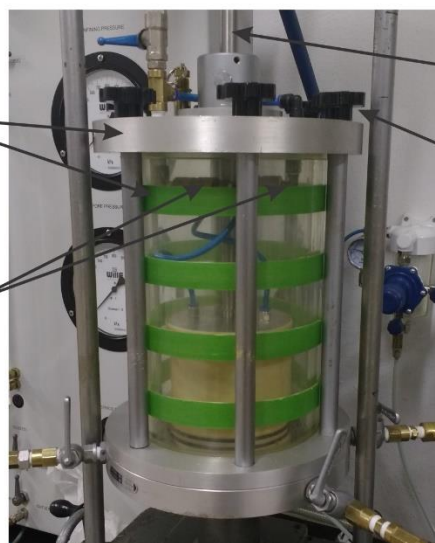
c) Estende-se a membrana e se fixa com o-rings



### Passo 5

a) Coloca-se o cilindro e a tampa da câmara

b) Liga-se as mangueiras do cabeçote as conexões da tampa



c) Situa-se o pistão

d) Fixa-se a tampa o cilindro e a base da câmara com os hastes

Figura 5.4. Montagem da amostra de solo na câmara do permeâmetro.

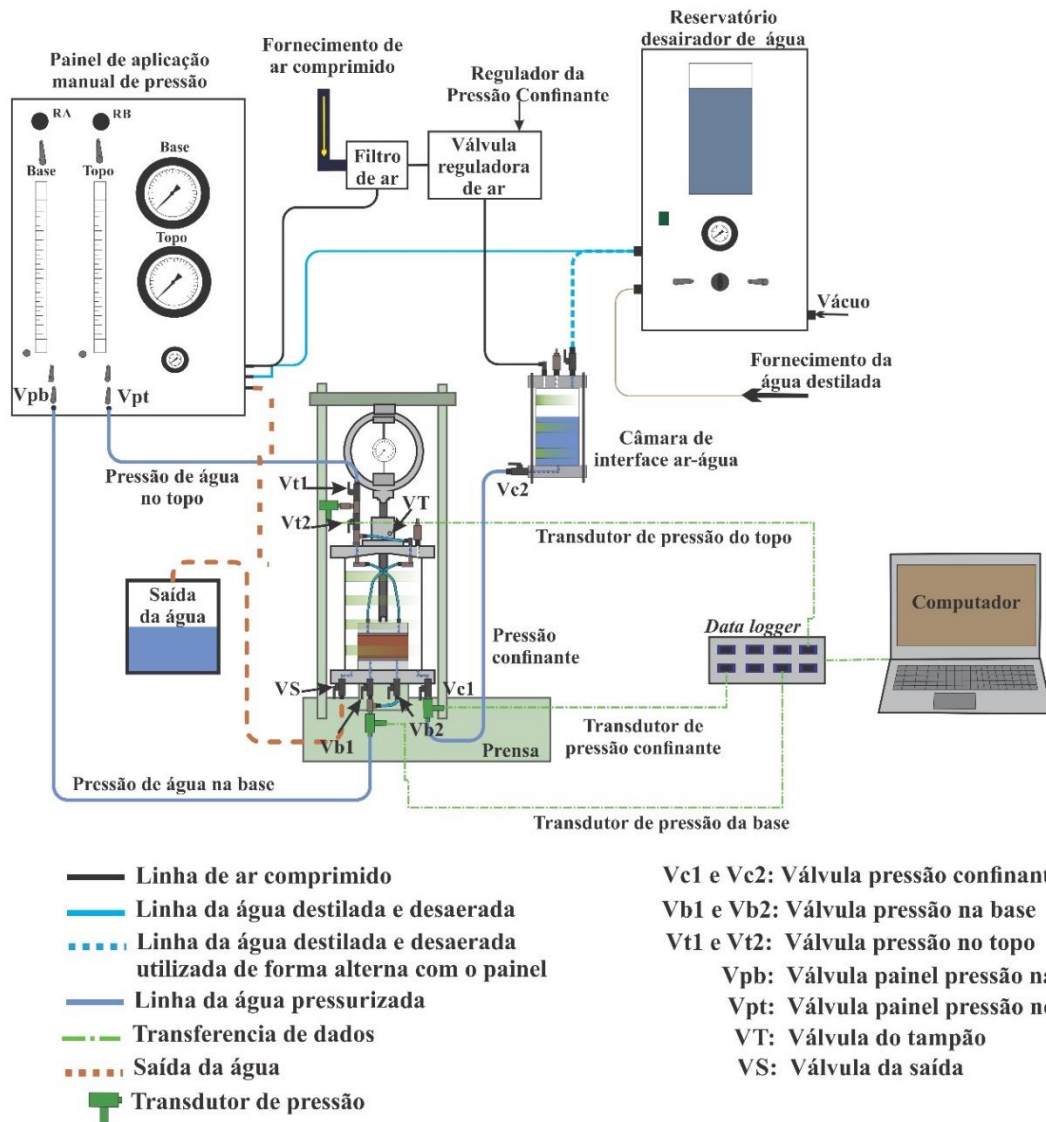
### 5.3.2 Fase 2: percolação

Esta fase realiza-se com a finalidade de reduzir o tempo de saturação durante o ensaio, o qual é recomendado para amostras que apresentem baixo grau de saturação. A norma (D5084-10-ASTM, 2010) recomenda submeter o corpo de prova a uma percolação no sentido ascendente, para a água não criar caminhos preferenciais (Olandoski, 2013) e facilitar a remoção de bolhas de ar localizadas na amostra.

Devido ao grau de saturação baixo que apresenta a amostra de solo realiza-se esta fase de acordo as recomendações da norma, e seguindo os passos descritos a continuação:

1. Liga-se a tubulação do reservatório na câmara de interface ar-água e abrem-se as válvulas da pressão confinante  $V_{c1}$  e  $V_{c2}$ , e o tampão VT, (Figura 5.5) para permitir a passagem da água e o preenchimento da câmara. Com a finalidade de garantir o preenchimento completo da câmara com água, deve-se permitir a passagem da água pelo tampão e depois devem ser fechadas a válvula C e o tampão.
2. Verifica-se que as tubulações da pressão confinante, pressão do topo e pressão da base estejam conectadas ao permeâmetro.
3. Preenche-se com água destilada e deaerada as buretas do painel de aplicação manual de pressão, onde a bureta da base deve-se preencher, a um maior nível de água que a bureta do topo.
4. Ajusta-se o regulador da pressão confinante para o valor de 20 kPa, e abre-se a válvula da pressão confinante para a aplicação da pressão na câmara do permeâmetro, espera-se o tempo suficiente (aproximadamente uns minutos) até a pressão se estabilizar.
5. Ajusta-se o regulador de pressão da base, RA, para 5 kPa, e abrem-se as válvulas do painel de controle e da base da câmara,  $V_{b1}$  e  $V_{b2}$ , para aplicação da pressão na amostra. Deixa-se em pressão atmosférica o topo da amostra, e abre-se válvula do topo  $V_{t1}$  e  $V_{t2}$ .
6. Junto com as válvulas da base, abrem-se as válvulas do topo para iniciar o fluxo na amostra de solo. Silveira (2008) recomenda que a percolação da água destilada e deaerada pelo interior da amostra seja realizada até que o volume percolado seja pelo menos de dois vezes o volume de vazios do solo.





**Figura 5.5. Diagrama esquemático do permeâmetro – Válvulas do sistema**

### 5.3.3 Fase 3: saturação por contrapressão

Terminada a fase de percolação, dá-se início à fase de saturação da amostra de solo pela utilização de incrementos de pressão confinante e contrapressão, em estágios de 50 kPa e dá-se início também ao monitoramento do parâmetro  $B$  de Skempton. Pode-se obter uma estimativa da contrapressão necessária para saturar a amostra de solo, utilizando a Equação (2.14). Para a aplicação deste incremento na amostra de solo realiza-se o seguinte procedimento:

1. As buretas do painel devem-ser preenchidas com água destilada e deaerada.
2. Com todas as válvulas fechadas, os reguladores de pressão são ajustados para uma pressão confinante inicial de 100 kPa, e uma contrapressão de 70 kPa, resultando



uma pressão confinante efetiva de 30 kPa. Para fazer leituras destas pressões no *software* de aquisição de dados, devem-se abrir as válvulas Vc2, Vpb, Vpt e Vt1.

3. Abre-se a válvula Vc1 para aplicação da pressão confinante e de forma simultânea a válvula Vb1 e Vb2, e imediatamente depois a válvula Vt2 para aplicação da contrapressão tanto na base como no topo (Figura 5.5).
4. Aplica-se a contrapressão com pequenos incrementos, num tempo suficiente entre os acréscimos (50 kPa) que permita a equalização da pressão de poros em toda a amostra, isso com a finalidade de assegurar que amostra não apresente pretensão durante a fase de saturação.
5. Aumenta-se a pressão confinante e a contrapressão, cuidando de sempre manter a contrapressão cerca 30 kPa a menos do que a pressão confinante (o nível de pressão para o ensaio realizado, foi mantido por aproximadamente três horas).
6. Para a leitura do parâmetro  $B$  de Skempton, fecham-se as válvulas Vpb, Vpt e Vc2, e fazem-se as leituras da pressão confinante e contrapressão.
7. Fecha-se a válvula Vc1 e abre-se a válvula Vc2.
8. Ajusta-se o regulador da pressão confinante para a aplicação de um incremento de 20 kPa, e abre-se a válvula Vc1. Depois se fazem as leituras no *software* de aquisição de dados das variações correspondentes na poropressão para o cálculo do parâmetro  $B$ . O tempo requerido para a estabilização da poropressão pode ser de poucos minutos até algumas horas dependendo da permeabilidade do solo (o tempo necessário para o ensaio realizado foi de aproximadamente 20 minutos).
9. Verifica-se a saturação da amostra com o cálculo do parâmetro  $B$ :

$$B = \frac{\Delta u_w}{\Delta \sigma_c}$$

onde,  $\Delta u_w$ =acrécimo da poropressão;  $\Delta \sigma_c$ = acréscimo da pressão confinante

10. Deve-se continuar realizando acréscimos da pressão confinante e contrapressão. Repetindo os passos 4, 5, 6 e 7 até alcançar um valor de  $B$  igual a 0,95 ou um valor de referência, onde se considera que o material encontra-se saturado.
11. Deve-se considerar, antes de aplicar um novo incremento nas pressões, retirar o incremento efetuado na pressão confinante.

#### 5.3.4 Fase 4: medição da condutividade hidráulica

Para gerar fluxo de água através da amostra de solo é necessário gerar um gradiente hidráulico. Este gradiente é produzido pela imposição de um diferencial de pressões na base e no topo da amostra de solo. A seguir apresenta-se o passo a passo para a medição da permeabilidade.

1. Preenche-se com água destilada e deaerada a bureta da base a um maior nível de água que a bureta do topo.
2. As válvulas da base da câmara do permeâmetro devem estar fechadas antes de fazer alterações durante o ensaio, isto com a finalidade de evitar que a amostra de solo sofra variações bruscas com as pressões exercidas nela.
3. Devem ser feitas medições da temperatura durante o desenvolvimento do ensaio, com a utilização de um termômetro digital ou num recipiente contendo água colocado ao lado do permeâmetro.
4. Mantenha-se a pressão confinante efetiva média de 30 kPa utilizada na fase de saturação e aumenta-se 5 kPa a pressão na base da amostra, isto último com a finalidade de gerar um fluxo ascendente entre a base e o topo devido à diferença de pressão entre as extremidades da amostra. Para fazer leituras destas pressões no *software* de aquisição de dados, devem-se abrir as válvulas Vc2, Vpb, Vpt e Vt1.
5. Abrem-se as válvulas Vb1, Vb2 e Vt2 (base e topo) e fazem-se medições e registros periódicos da quantidade de fluxo de entrada e saída, em vários intervalos de tempo com ajuda de um cronômetro.
6. O ensaio deve ser realizado até, pelo menos, obter quatro valores de condutividade hidráulica ao longo do tempo, onde:
  - i) A razão entre o fluxo de entrada e saída tenha uma taxa entre 0,75 e 1,25 (D5084-10-ASTM, 2010).
  - ii) A condutividade hidráulica encontre-se estável.

Para este último item, considera-se que a condutividade hidráulica é estável quando são determinados quatro ou mais valores consecutivos dentro do  $\pm 25\%$  ou mais do valor médio para valores de  $k \geq 1 \times 10^{-10}$  m/s, ou dentro do  $\pm 50\%$  ou mais para valores de  $k < 1 \times 10^{-10}$  m/s, e quando no gráfico da condutividade hidráulica com o tempo não

apresenta-se tendência significativa para cima ou para baixo (D5084-10-ASTM, 2010).

7. Devem-se fazer correções de temperatura e determinar a condutividade hidráulica.

### **5.3.5 Fase 5: desmontagem do ensaio**

Para a desmontagem do ensaio, primeiro deve-se aliviar as pressões exercidas na câmara, durante o desenvolvimento do ensaio, depois abrir o tampão VT, e a válvula VS, para a saída da água da câmara, e por último, o desmonte do pistão, os hastes para fixação e o corpo de prova.

## **5.4 RESULTADOS**

Os resultados são apresentados de acordo com o desenvolvimento de cada uma das fases do ensaio de condutividade hidráulica.

### **5.4.1 Fase 2: percolação**

Esta fase consistiu na tentativa de aumentar o grau de saturação da amostra de solo, o qual se encontrava baixo ( $S_r = 49,5\%$ ). Iniciou-se esta fase com uma pressão confinante igual a 20 kPa, uma pressão na base igual a 5 kPa e pressão atmosférica no topo, mas devido ao pouco volume percolado na amostra depois de determinado tempo, decidiu-se aumentar as pressões para: confinante de 50 kPa, base de 25 e topo 20 kPa. Ainda assim não foi obtido que o volume percolado na amostra de solo fosse duas vezes seu volume de vazios, de modo que se optou por continuar com a seguinte fase do ensaio, a qual foi a saturação por contrapressão.

### **5.4.2 Fase 3: saturação por contrapressão**

A fase de saturação por contrapressão iniciou com uma pressão confinante de 100 kPa e uma contrapressão de 70 kPa, foram adotados estágios de pressão de aproximadamente 50 kPa, tanto na pressão confinante como na contrapressão, sempre mantendo uma pressão confinante efetiva de 30 kPa aproximadamente.

Para o monitoramento do parâmetro  $B$  de Skempton foram aplicados acréscimos na pressão confinante de 20 kPa e lidas as respectivas variações na poropressão. A amostra de solo considerou-se saturada quando o parâmetro  $B$  foi igual a 0,95 (D5084-10-ASTM, 2010). De

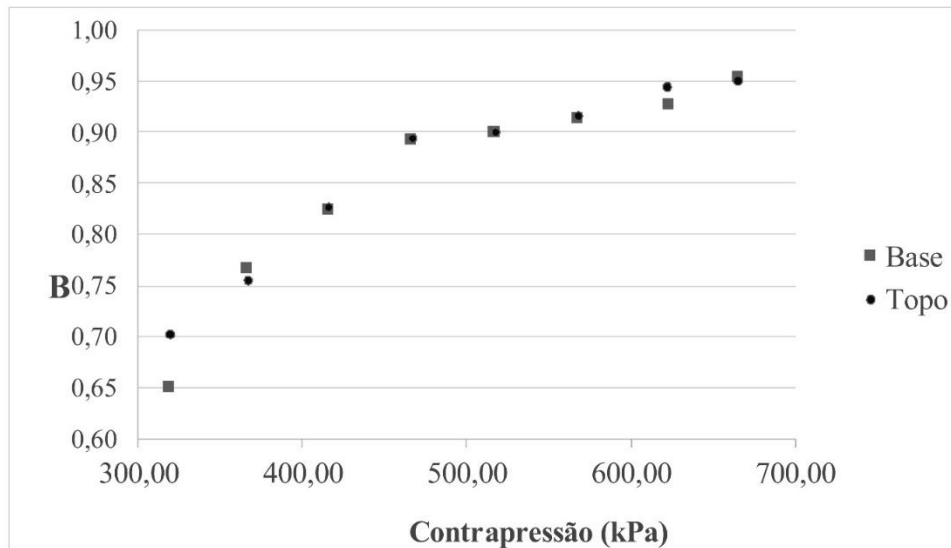
acordo a Equação (2.14) e ao grau de saturação inicial da amostra de solo, para obter um valor de  $B$  igual a 0,95 tem-se que aplicar uma contrapressão de 658 kPa.

Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores obtidos para o parâmetro  $B$  de Skempton, onde se pode ver que o valor da contrapressão necessária para atingir um valor de  $B$  de 0,95 é aproximado ao valor obtido com a Equação (2.14), isto confirma que esta equação dá um valor muito próximo ao valor necessário para saturar a amostra de solo, de acordo ao grau de saturação inicial.

**Tabela 5.1. Valores utilizados no ensaio de condutividade hidráulica na fase de saturação por contrapressão.**

Pressão confinante (kPa)	$\Delta$ Pressão confinante (kPa)	Contrapressão (kPa)	$\Delta$ Contrapressão (kPa)	Pressão efetiva (kPa)	Parâmetro B
348,4	18,0	319,2	11,7	29,1	0,65
366,4		330,9		35,5	
400,8	20,3	366,7	15,5	34,1	0,77
421,1		382,2		38,8	
449,5	19,9	415,9	16,4	33,6	0,82
469,4		432,3		37,2	
500,9	19,2	466,4	17,2	34,5	0,89
520,1		483,6		36,6	
549,6	20,0	517,3	18,0	32,3	0,90
569,6		535,3		34,3	
600,4	17,3	567,6	15,8	32,8	0,91
617,7		583,4		34,3	
649,6	19,5	622,6	18,1	27,0	0,93
669,1		640,7		28,4	
699,7	19,0	665,6	18,1	34,1	0,95
718,7		683,7		35,0	

Na Figura 5.6 apresenta-se um gráfico com a variação do parâmetro  $B$  de Skempton em relação à contrapressão aplicada no topo e na base da amostra para sua saturação. Como se pode ver no gráfico, o parâmetro  $B$  vai aumentando assim que é aumentada a contrapressão na amostra, isto indica que a quantidade de ar na amostra vai diminuindo a medida que o  $B$  vai aumentando, conseqüentemente também aumenta o grau de saturação da amostra. Pode-se perceber no gráfico que as pressões no topo e na base da amostra são muito próximas.



**Figura 5.6. Variação de B com a Contrapressão de base e topo da amostra de solo.**

### 5.4.3 Fase 4: medição da condutividade hidráulica

Nesta fase do ensaio foram realizadas leituras da condutividade hidráulica para gradientes de 1, 6 e 10. Para cada um destes gradientes foram realizadas leituras de volume nas buretas de entrada e saída do painel de aplicação manual de pressão. A condutividade hidráulica foi obtida gerando um fluxo ascendente na amostra de solo, mediante a aplicação de um diferencial de pressão entre a base e o topo da amostra. Foi mantida uma pressão confinante efetiva de 30 kPa aproximadamente. Os valores da condutividade hidráulica da amostra de solo para os diferentes gradientes citados acima são apresentados nas Tabela 5.2, Tabela 5.3, e na Tabela 5.4.

**Tabela 5.2. Resultados da condutividade hidráulica para um  $i = 1,0$ .**

t (minutos)	$\Delta t$ (minutos)	Vin (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin$ (cm <sup>3</sup> )	Vout (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vout$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin/\Delta Vout$	k (cm/s)	k <sub>20</sub> (cm/s)
0	0	20,0	-	39,80	-	-	-	
32	32	28,0	8,0	31,60	8,2	0,98	$3,22 \times 10^{-5}$	$3,05 \times 10^{-5}$
52	20	30,0	2,0	29,80	1,8	1,11	$1,13 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{-5}$
72	20	35,0	5,0	24,80	5,0	1,00	$3,14 \times 10^{-5}$	$2,98 \times 10^{-5}$
92	20	40,0	5,0	19,80	5,0	1,00	$3,14 \times 10^{-5}$	$2,98 \times 10^{-5}$
112	20	45,0	5,0	14,80	5,0	1,00	$3,14 \times 10^{-5}$	$2,98 \times 10^{-5}$
132	20	49,5	4,5	10,20	4,6	0,98	$2,89 \times 10^{-5}$	$2,74 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio de k<sub>20</sub> (cm/s)</b>								<b><math>2,63 \times 10^{-5}</math></b>

Vin: volume de entrada; Vout: volume de saída

**Tabela 5.3. Resultados da condutividade hidráulica para um  $i = 6,0$ .**

t (minutos)	$\Delta t$ (minutos)	Vin (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin$ (cm <sup>3</sup> )	Vout (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vout$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin/\Delta Vout$	k (cm/s)	k <sub>20</sub> (cm/s)
0	0	39,5	-	43,2	-	-	-	-
1	1	44,0	4,5	38,6	4,6	0,98	$9,63 \times 10^{-5}$	$9,13 \times 10^{-5}$
2	1	48,5	4,5	34,4	4,2	1,07	$8,79 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-5}$
3	1	52,0	3,5	31,0	3,4	1,03	$7,12 \times 10^{-5}$	$6,75 \times 10^{-5}$
5	2	58,5	6,5	24,4	6,6	0,98	$6,91 \times 10^{-5}$	$6,55 \times 10^{-5}$
10	5	70,0	11,5	14,0	10,4	1,11	$4,35 \times 10^{-5}$	$4,13 \times 10^{-5}$
15	5	75,0	5,0	8,0	6,0	0,83	$2,51 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-5}$
20	5	81,0	6,0	2,0	6,0	1,00	$2,51 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio de k<sub>20</sub> (cm/s)</b>								<b><math>6,91 \times 10^{-5}</math></b>

Vin: volume de entrada; Vout: volume de saída

**Tabela 5.4. Resultados da condutividade hidráulica para um  $i = 10,0$ .**

t (minutos)	$\Delta t$ (minutos)	Vin (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin$ (cm <sup>3</sup> )	Vout (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vout$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta Vin/\Delta Vout$	k (cm/s)	k <sub>20</sub> (cm/s)
0	-	11,0	-	41,8	-	-	-	-
1	1	20,0	9,0	31,8	10,0	0,90	$1,26 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-5}$
2	1	27,5	7,5	24,4	7,4	1,01	$9,29 \times 10^{-5}$	$8,82 \times 10^{-5}$
3	1	35,0	7,5	17,4	7,0	1,07	$8,79 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-5}$
4	1	42,5	7,5	9,8	7,6	0,99	$9,54 \times 10^{-5}$	$9,05 \times 10^{-5}$
5	1	49,5	7	2,2	7,6	0,92	$9,54 \times 10^{-5}$	$9,05 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio de k<sub>20</sub> (cm/s)</b>								
0	-	49,5	-	40	-	-	-	-
1	1	56,5	7,0	33,0	7,0	1,00	$8,79 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-5}$
2	1	64,0	7,5	25,6	7,4	1,01	$9,29 \times 10^{-5}$	$8,82 \times 10^{-5}$
3	1	71,5	7,5	18,0	7,6	0,99	$9,54 \times 10^{-5}$	$9,05 \times 10^{-5}$
4	1	79,0	7,5	11,0	7,0	1,07	$8,79 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-5}$
5	1	87,0	8,0	4,0	7,0	1,14	$8,79 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-5}$
<b>Valor médio de k<sub>20</sub> (cm/s)</b>								<b><math>9,01 \times 10^{-5}</math></b>

Vin: volume de entrada; Vout: volume de saída

O valor médio da condutividade hidráulica obtido por Oliveira (2003) numa câmara triaxial ( $k = 5 \times 10^{-5}$  cm/s), fica dentro do intervalo dos valores médios obtidos neste estudo,  $2,63 \times 10^{-5} < k < 9,01 \times 10^{-5}$  cm/s. É importante mencionar que o objetivo do ensaio nesta pesquisa foi provar a operação do equipamento, ainda assim o valor da permeabilidade obtido e coerente com os publicados em outros trabalhos em dispositivos com características semelhantes.

Será necessário realizar em pesquisas futuras ensaios de permeabilidade em materiais com valores da condutividade hidráulica conhecidos com o objetivo de validar a eficiência do equipamento desenvolvido.

### 6 CONCLUSÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Apresentou-se nesta dissertação o melhoramento do projeto do permeâmetro de parede flexível desenvolvido por Rodríguez (1996), sua construção no laboratório do programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, e seu teste para o estudo de materiais de baixa condutividade hidráulica. As principais conclusões desta pesquisa são agrupadas de acordo à etapa desenvolvida, descritas a continuação.

##### – ETAPA 1-PROJETO

Nesta etapa obteve-se o projeto do permeâmetro de parede flexível e carga constante, no qual foram consideradas as principais vantagens de outros equipamentos desenvolvidos, implementando algumas melhorias, além das condições e recursos disponíveis no laboratório de geotecnia para sua instalação.

O projeto do permeâmetro apresentou um equipamento que permite a realização de ensaios com maior proximidade às condições naturais nas que o solo se encontra no terreno. Desta forma, no equipamento desenvolvido, é possível ter o controle das tensões aplicadas na amostra, a aplicação de tensão desviadora que permite a possibilidade de realizar medições de permeabilidade com algumas condições de carga e fluxo, realizar ensaios em corpos de prova de maior diâmetro (130 mm), o que permite ter maior representatividade, assim como realizar ensaios com amostras de diferentes materiais e diâmetros. Adicionalmente, o tempo de ensaio foi reduzido devido a que a amostra apresenta menor altura (55 mm).

##### – ETAPA 2- CONSTRUÇÃO

Foi construído um permeâmetro de parede flexível e carga constante composto de uma câmara de acrílico, um sistema de aplicação e medição de pressões e um sistema de aquisição de dados. Este equipamento permite a saturação do corpo de prova por contrapressão, a confirmação da saturação da amostra com o parâmetro B de Skempton, a diminuição dos fluxos laterais pela utilização de uma membrana flexível e a aplicação de diferentes gradientes hidráulicos, por diferenças de pressão exercidas no topo e base da amostra.



A fabricação da peça para compactação e moldagem de amostras, permitiu a obtenção do tamanho do corpo de prova projetado de maneira simples. Esta peça possibilita a realização de ensaios no equipamento com amostras tanto compactadas como indeformadas.

#### – ETAPA 3- INSTRUMENTAÇÃO

O sistema de aquisição de dados apresentou facilidade no momento de sua configuração com o equipamento, este sistema permite a medição de uma ampla gama de diferentes magnitudes, como pressões, deformações, forças, deslocamentos e temperaturas.

Os transdutores instalados no topo e a base da amostra, junto com o transdutor para medição da pressão confinante, permitem determinar o parâmetro B de Skempton, e conseqüentemente confirmar a saturação da amostra de solo, além de possibilitar medidas com maior precisão e acurácia.

#### – ETAPA 4- OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Apresentou-se nesta etapa o desenvolvimento das instruções para uma correta operação e uma maior facilidade na hora de realizar os ensaios no permeâmetro. Nelas são detalhados cada um dos passos necessários para a execução das diferentes fases que compõem o ensaio de condutividade hidráulica.

A operação do equipamento foi validada com a realização de cada uma das fases que envolvem o ensaio de condutividade hidráulica, como são a montagem do corpo de prova, a saturação da amostra por contrapressão, a medição da condutividade hidráulica e finalmente a desmontagem do ensaio.

Para o ensaio teste do permeâmetro na sua validação de operação utilizou-se um corpo de prova indeformado de argila do campo experimental da UnB. No ensaio a amostra foi saturada com a utilização de uma contrapressão igual a 684 kPa aproximadamente e obtiveram-se valores médios de condutividade hidráulica entre  $2,63 \times 10^{-5} < k < 9,03 \times 10^{-5}$  cm/s, valores coerentes de acordo ao publicado em outros trabalhos para o mesmo material, em dispositivos com características semelhantes.

A Equação 13, apresentada no item 2.4.4 permite obter um valor bem próximo da contrapressão necessária para alcançar determinado grau de saturação numa amostra de solo. A

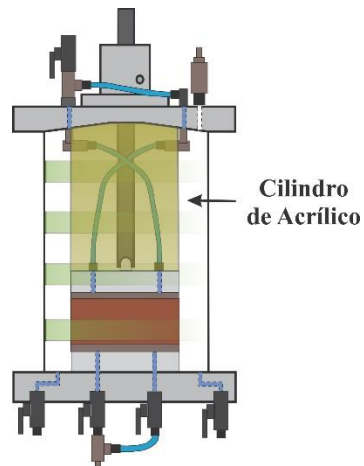
equação somente precisa do grau de saturação inicial da amostra e o grau de saturação final desejado.

## **6.2 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Com a finalidade de obter resultados mais próximos às condições reais dos projetos, assim como uma maior aplicabilidade em diferentes áreas, se propõem algumas modificações no permeâmetro que podem ser realizadas em futuras pesquisas:

- Sugere-se realizar uma modificação no painel de aplicação manual de pressões, com a finalidade de facilitar a aplicação da contrapressão na base e no topo da amostra. A modificação do painel deverá permitir, no momento de saturação da amostra, direcionar a mesma quantidade de ar comprimido as buretas, e desta maneira aplicar a mesma contrapressão na base e no topo do corpo de prova.
- Propõe-se a instalação de um transdutor diferencial de pressão entre o topo e a base da amostra, que permita maior precisão e acurácia na aplicação das pressões.
- Propõe-se a instalação de transdutores de vazão que permitiram a automatização do equipamento.
- Sugere-se utilizar diferentes tipos de solos (como o caulim), com condutividades hidráulicas conhecidas de equipamento similares, para realizar ensaios que permitam calibrar o equipamento desenvolvido.
- Recomenda-se que para a utilização de fluidos percolantes químicos ou poluentes no permeâmetro, seja realizado um recobrimento do corpo de prova com teflon, para assim evitar problemas de compatibilidade da membrana de látex e os percolantes utilizados. Além disso, deve-se verificar a compatibilidade deste poluente com as peças que entrarão em contato no equipamento. No caso de incompatibilidade, fazer as modificações correspondentes ou instalações de conexões que permitam a realização do ensaio.
- Sugere-se realizar um estudo do efeito do estado inicial de tensões na permeabilidade de materiais que apresentam baixa condutividade hidráulica.
- Sugere-se uma modificação na câmara que permita a medição da condutividade hidráulica horizontal, em que as condições do esforço vertical sejam muito maiores

do que o esforço horizontal (como acontece nos núcleos impermeáveis das barragens). Propõe-se para esta modificação, que no equipamento seja isolada a parte atuante do esforço horizontal da parte vertical na amostra de solo, para isto é necessária a utilização de uma peça de acrílico posicionada entre o cabeçote e a tampa do permeâmetro como a apresentada na Figura 6.1, esta peça deverá ser vedada com dois *o' rings*.



**Figura 6.1. Modificação Câmara do permeâmetro.**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABCP. (2013). Ensaios de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, pp. 80.
- ABNT. (1986). Preparação de amostras de solo para ensaio de compactação e ensaios de caracterização.
- ABNT. (1995). Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.
- ABNT. (2000). Solo-determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.
- AGAB, A.F. (2005). Hydraulic and Thermal Conductivities of Soils. University of Newcastle. pp.190.
- ALONSO, T.D.P. (2005). Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível. Universidade de São Paulo. pp.137.
- ARARUNA, J.. (1995). Measurements of permeability of soils using a flow pump: development and evaluation of equipment and test procedure. University of Newcastle upon Tyne.
- ASSAAD, J.J. & ISSA, C.A. (2013). Mechanisms of strength loss in underwater concrete. Mater. Struct., 46(10): 1613–1629.
- AUVINET, G. & ESPINOSA, J. (1981). Impermeabilization of a 300-hectare cooling pond. ASTM Int. West Conshohocken, PA, : 151–167.
- BADILLO, E.J. & RODRÍGUEZ, A.R. (1969). Mecánica de suelos. Editorial Limusa.
- BERTHILA, E.V.P. (2005). Consideraciones Geotécnicas en el Diseño de Lagunas de Estabilización. Universidad Nacional autónoma de México. pp.150
- BOTELHO, A.P.D. (2001). Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo. Universidade Federal de Ouro Preto. pp.254.
- BOYTON, S.S. & DANIEL, D.E. (1985). Hydraulic conductivity tests on compacted clay. Am. Soc. Civ. Eng., 111: 465–478.

- BUCKINGHAM, E. (1907). Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC. pp.61.
- BURGOS, J.F.L. (2016). Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados. Universidade de Brasília. pp.158.
- CABERLON, R.C. (2004). Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados. Universidade Federaç do Rio Grande do Sul. pp.109.
- CAVALCANTE, E.H., GIACHETI, H.L., DANZIGER, F.A.B. & COUTINHO, R.Q. (2006). Campos experimentais brasileiros. pp.91.
- CHEN, C. (1997). An Investigation into the relationship between effective stress and permeability of clays. University of Newcastle upon Tyne.
- CHILDS, E.C. (1969). Introduction to the physical basis of soil water phenomena.
- COOPER, W.D. & HELFRICK, A.D. (1991). Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. pp.233.
- CRAIG, R.F. (2004). Craig's Soil Mechanics. J. Chem. Inf. Model., 53. pp.458.
- D5084-10-ASTM. (2010). Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM Int. West Conshohocken, PA, : 1–24.
- DANIEL, D.E. (1994). State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 49.
- DANIEL, D.E., ANDERSON, D.C. & BOYTON, S.S. (1985). Fixed-wall versus flexible-wall permeameters. Hydraulic barriers in soil and rock, Johnson, A., Frobels, R., Cavalli, N. & Pettersson, C. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 107–126.
- DANIEL, D.E., BOWDERS, J.J. & GILBERT, R.B. (1997). Laboratory hydraulic conductivity testing of gcls in flexible-wall permeameters. Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, Well, L.W. (Ed.),.
- DAS, B.M. (2007). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 6ª edição norte americana pp.123.
- DAS, B.M. (2008). Advanced Soil Mechanics. PhD Propos., Tercera Ed. 1. pp.594.

- DIEMER, F., RAMBO, D., SPECHT, L.P. & POZZOBON, C.E. (2008). Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí / rs geotechnical properties of residual basalt soil of Ijuí region : 25–36.
- DOURADO, K.A. (2003). Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida. Universidade de São Paulo. pp.89.
- FARNEZI, M.K. (2006). Alternativa de melhoramento técnico de solos tropicais para uso em sistemas basais de selagem através de aplicação de bentonita. Universidade Federal de Ouro Preto. pp.107.
- FREDLUND, D.. & RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley Sons, Inc.,. pp.517.
- GAO, J., GUO, C. & LIU, Y. (2014). Measurement of pore water pressure in asphalt pavement and its effects on permeability. *Measurement*, 62: 81–87.
- GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. 10.1017/CBO9781107415324.004. pp.180.
- HEAD, K.H. (1986). Manual of soil laboratory testing, volume 3: effective stress tests. pp.787- 796.
- HEAD, K.H. (1994). Manual of soil laboratory testing. Vol. 2. Permeability, shear strength and compressibility tests. . Geoderma, 10.1016/0016-7061(95)90001-2, New York, Geoderma,. pp.339-340.
- HUANG, S., FREDLUND, D.G. & BARBOUR, S.L. (1998). Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter. *Can. Geotech. J.*, 35(3): 426–432.
- IGLESIAS, C.P. (1997). 8. hidráulica del suelo. *Mecánica de Suelos*, Editorial Síntesis, S.A., Vallehermoso, pp. 247–323.
- KODIKARA, J.K. & RAHMAN, F. (2002). Effects of specimen consolidation on the laboratory hydraulic conductivity measurement. *Can. Geotech. J.*, 39(4): 908–923.
- LAMBE, T.W. & WHITMAN, R. V. (1979). Soil mechanics, SI version. , Series in soil engineering. Wiley.

- LOPEZ, E. (2012). Estudio Experimental de la Permeabilidad de Materiales Depositados en Pilas de Lixiviación. Universidad de Chile. pp.150.
- LOWE, J. & JOHNSON, T.C. (1960). Use of back pressure to increase degree of saturation of triaxial test specimens.
- LUKIANCHUKI, J.A. (2007). Influência do teor de Bentonita na condutividade hidráulica e na resistência de um solo. Universidade de São Paulo. pp.150.
- MCCARTNEY, J. (2007). Determination of the Hydraulic Characteristics of Unsaturated Soils Using a Centrifuge Permeameter. University of Texas at Austin. pp.388
- MESRI, G. & OLSON, R.E. (1971). Mechanism controlling the permeability of clays. Clay Clay Minerals, 19: 151–158.
- MITCHEL, J.K. (1993). Fundamentals of soil behavior. 2ª edição. Berkeley: John Wiley & Sons. pp.437.
- MIYAZAKI, T. (2005). Water Flow In Soils, Second Edition. , Books in Soils, Plants, and the Environment. CRC Press. pp.440.
- MONROY, M.J., DÍAZ, A.A. & ACEVEDO, H.F. (2009). Instrumentación del equipo de laboratorio de resistencia de materiales para ensayos dinámicos a flexión de probetas ranuradas. Sci. Tech., (41): 352–356.
- MOTA, N. (2003). Ensaio avançado de campo na Argila Porosa não Saturada de Brasília: interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. pp.335.
- NAGARAJ, T.S., PANDIAN, N.S. & NARASIMHA, P.S.R. (1993). Stress state-permeability fine-grained. Géotechnique, 43(2): 333–336.
- OLANDOSKI, M. (2013). Validação de um permeômetro de parede flexível. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. pp.126.
- OLIVEIRA, D.R. (2003). Análise da interação solo-atmosfera durante a secagem para a argila porosa de Brasília. Universidade de Brasília. pp.187.
- PINTO, C. DE S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 Aulas. Oficina de textos, São Paulo. pp.367.
- REDDI, L.N. (2003). Seepage in Soils: Principles and Applications. Wiley.
- RODRÍGUEZ, J.F.R. (1996). Determinación de las pérdidas por filtración en una laguna artificial de evaporación solar de 1400ha. Universidad Nacional Autónoma de México.

pp.75.

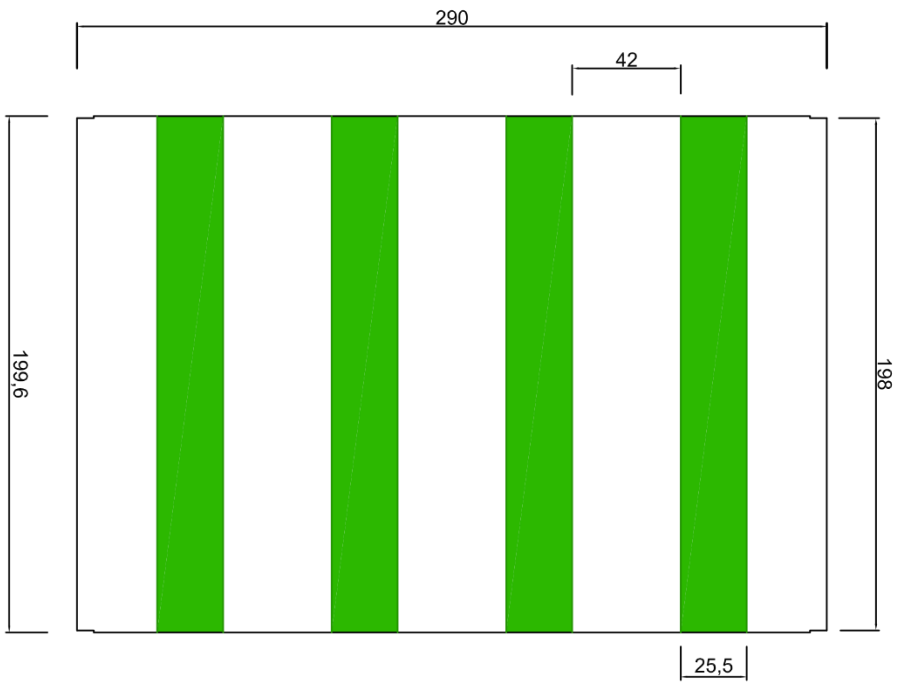
- ROSA, J. DE LA. (2008). Diseño, instrumentación y puesta en servicio de un permeámetro de carga constante. Instituto Politécnico Nacional. pp.99.
- SAMARASINGHE, A.M., HUAN, Y.H. & P, D. V. (1982). Permeability and consolidation of normally consolidated soils. J. Geotech. Eng. Div. ASCE, 108: 835–850.
- SAMINGAN, A.S., LEONG, E.-C. & RAHARDJO, H. (2003). A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils. Can. Geotech. J., 40(3): 559–574.
- SANTOS, A.G. (2004). Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Universidade Federal de Ouro Preto. pp.213.
- DOS SANTOS, J.P. (2005). Estudo da condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria. pp.154
- SARSBY, R.W. (2000). Environmental Geotechnics. Thomas Telford. pp.584.
- SHACKELFORD, C.D. (1994). Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, Daniel, D.E. & J., T.S. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 611.
- SILVA, J.P. (2007). Estudos preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Universidade de Brasília. pp.155.
- SILVEIRA, R.M. DA. (2008). Comportamento Geotécnico de um Solo Coluvionar de São Vendelino (RS). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. pp.302.
- SKEMPTON, A.. (1954). The pore pressure coefficients, a and b. Geotechnique, 4: 143–147.
- TAVENAS, F., JEAN, P., LEBLOND, F.T.P. & LEROUEIL, S. (1983). The permeability of natural soft clays. part ii: permeability characteristics. Can. Geotech. J., 20 No 4: 645–600.
- TAYLOR, D.W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. Nova York:
- TINDALL, J.. & KUNKEL, J.. (1999). Unsaturated Zone Hydrology for Environmental Scientists and Engineers: Prentice-Hall, Englewood Cliffs. New Jersey. pp.625.
- VERRUIJT, A. (2012). Soil Mechanics. Delft University of Technology, Delft. pp.331.
- WHITLOW, R. (1995). Basic Soil Mechanics. 3th ed. pp.559



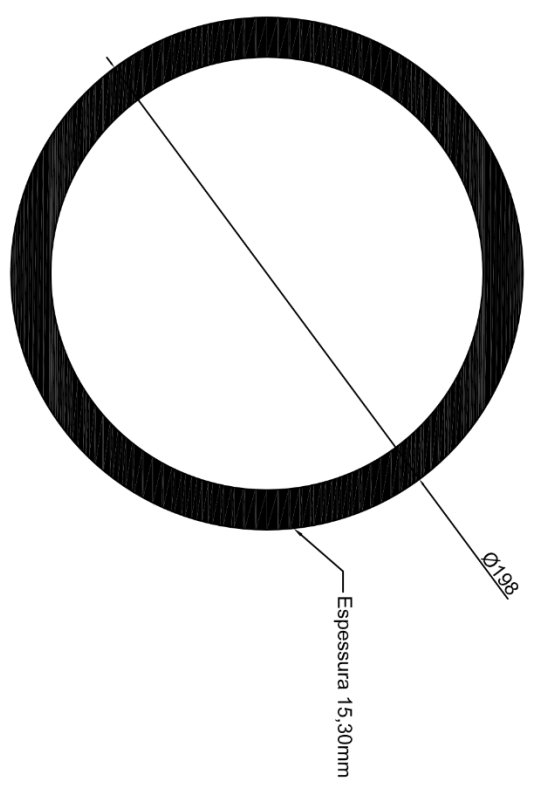
# **APÊNDICE A**

---

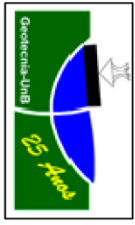
## **APENDICE A- PRANCHAS DAS PEÇAS QUE COMPÕEM O PERMEÂMETRO**



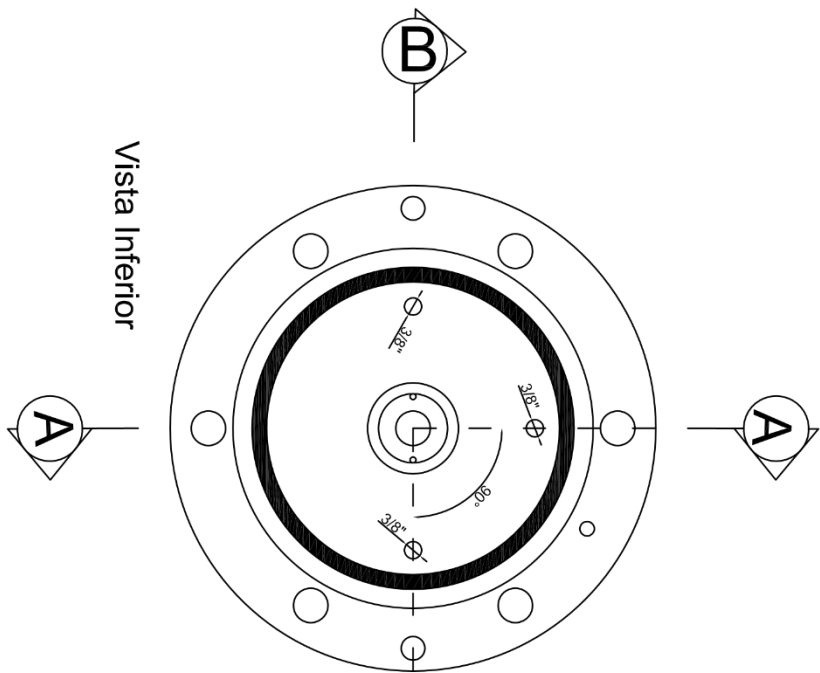
Vista Frontal



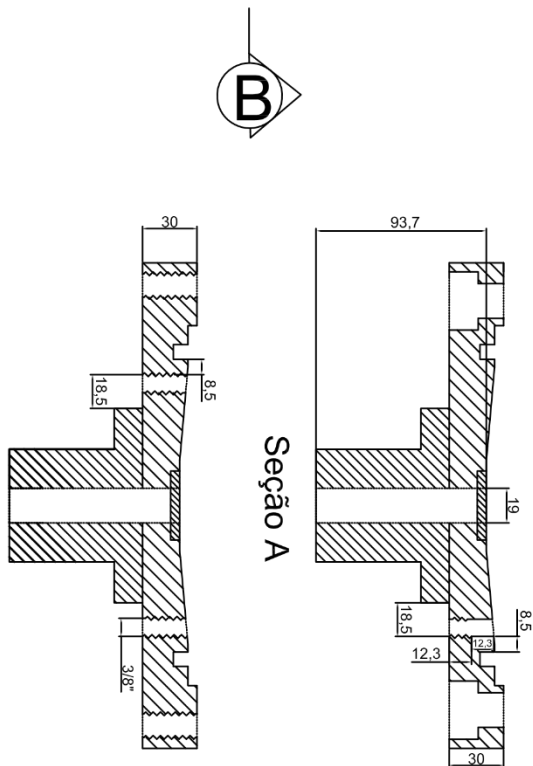
Vista Superior



<b>CÂMARA</b>	
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIN ESCALA
PERMEMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: MARZO 2016
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CÓDIGO: Ca-02
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
CORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	02-Camara



Vista Inferior



Seção A

Seção B

Notas:

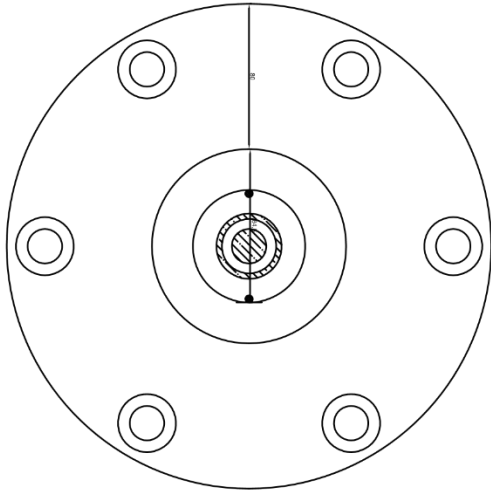
1. Todas as dimensões estão em mm



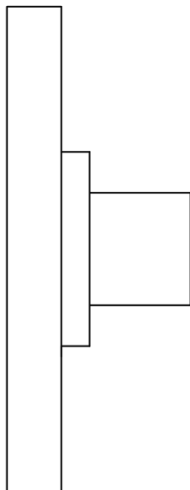
### Tampa Câmara - Vista Inferior

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SEM ESCALA
PERMMENTRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: MARÇO 2016
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: CA-04-1
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
CORRENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	04-1-Câmara Tampa-Vista Inferior

Vista Superior



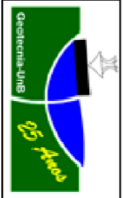
Vista Frontal

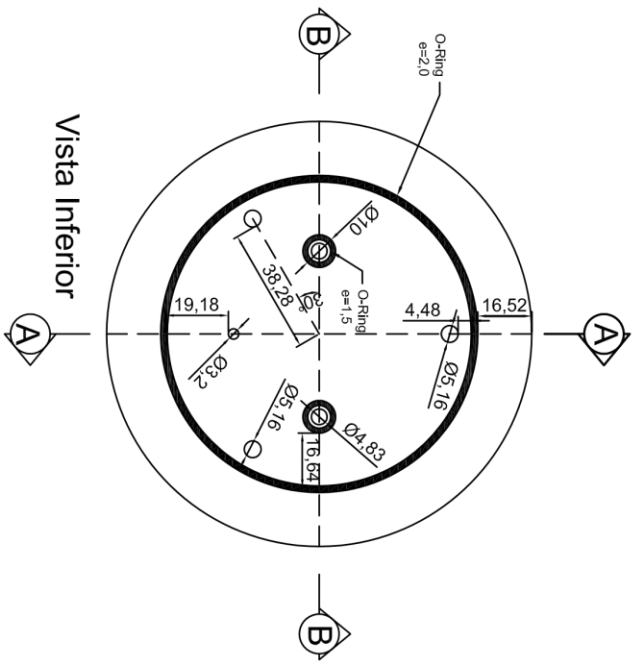


Notas:  
1. Todas as dimensões estão em mm

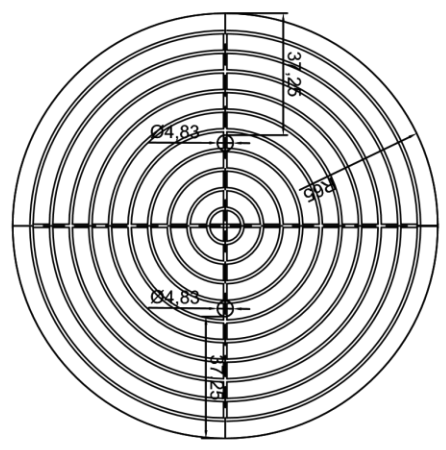
### Tampa Câmara - Vista Superior

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA:
PERMANENTE DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	SIN ESCALA
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	FECHA: MARZO 2016
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	CODIGO: Ca-04-2
CORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	ARQUIVO DIGITAL: 04-2-Câmara Tampa-Vista Superior

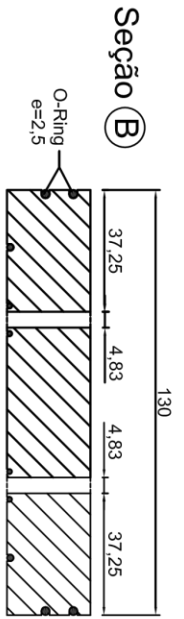




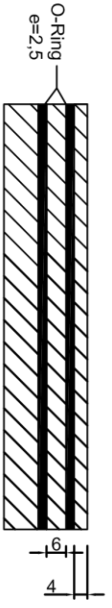
Vista Inferior



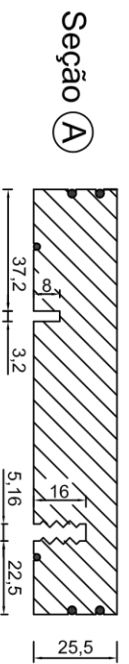
Vista Superior



Seção B

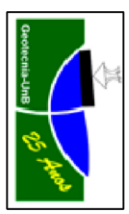


Vista Frontal

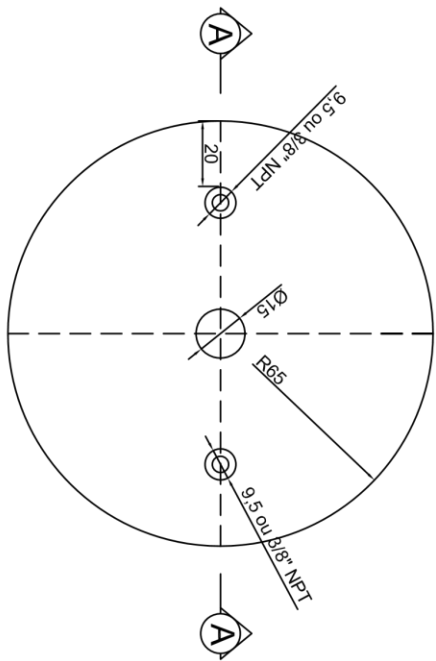


Seção A

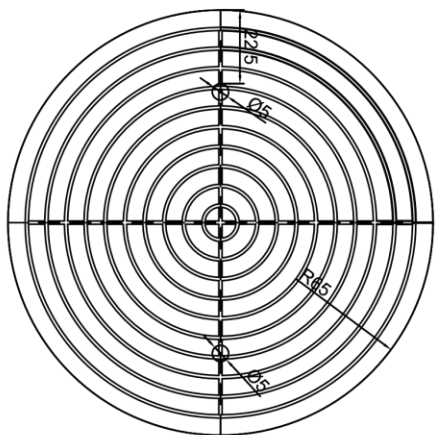
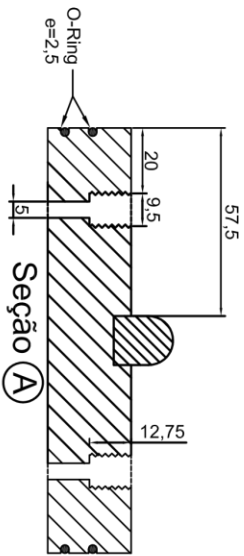
- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. Os material da peça é Alumínio



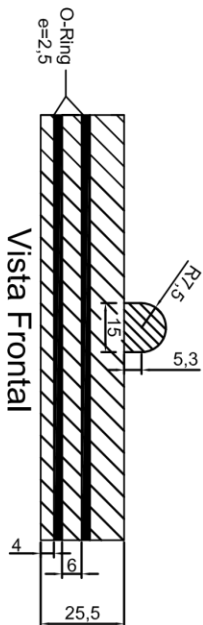
<b>BASE SUPORTE AMOSTRA</b>	
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIM ESCALA
PERMEALÍMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	FOLHA: 06
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	05-Amostra Base-Clotada



Vista Superior



Vista Inferior



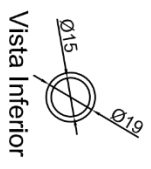
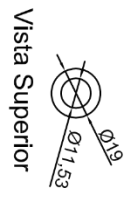
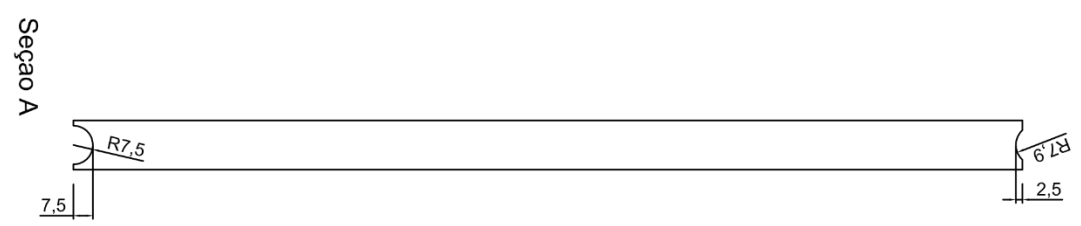
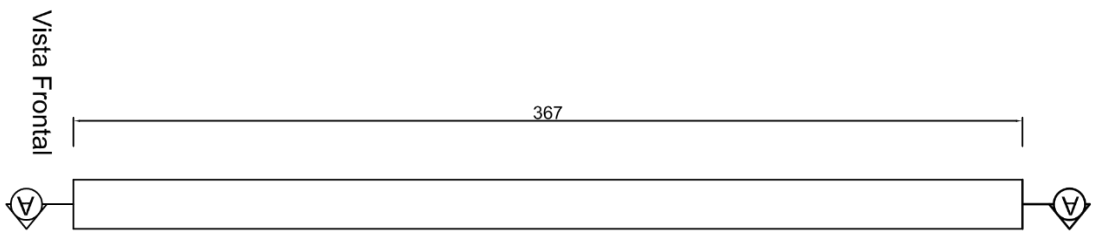
Vista Frontal

- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material da peça é Alumínio

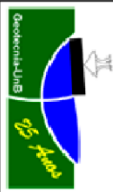
### CABEÇOTE SUPORTE AMOSTRA

PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIM ESCALA
PERMEALMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FOLHA: 19 AGOSTO 2015
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	FOLHA: 07
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	05-Amostra Base-Cabeçote

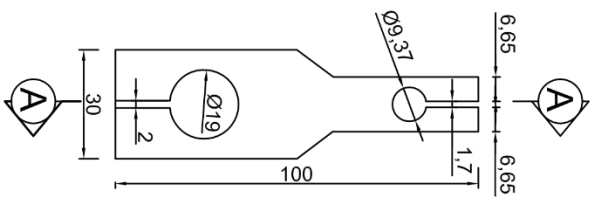




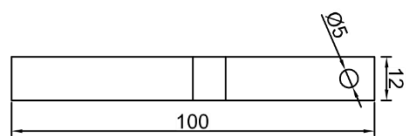
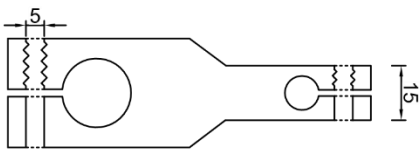
Notas:  
 1. Todas as dimensões estão em mm  
 2. O material da peça é AçoInox

		<b>PISTÃO</b>	
		PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SEM ESCALA
PERMEABILIDADE DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL		FECHA: 20 JULHO 2014	
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE		FOLHA: 08	
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ		ARQUIVO DIGITAL:	
CORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS		06-Fisiao	

Vista Superior



Seção A

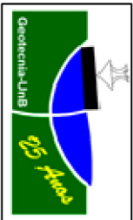


Vista Frontal

- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material das peças é Alumínio

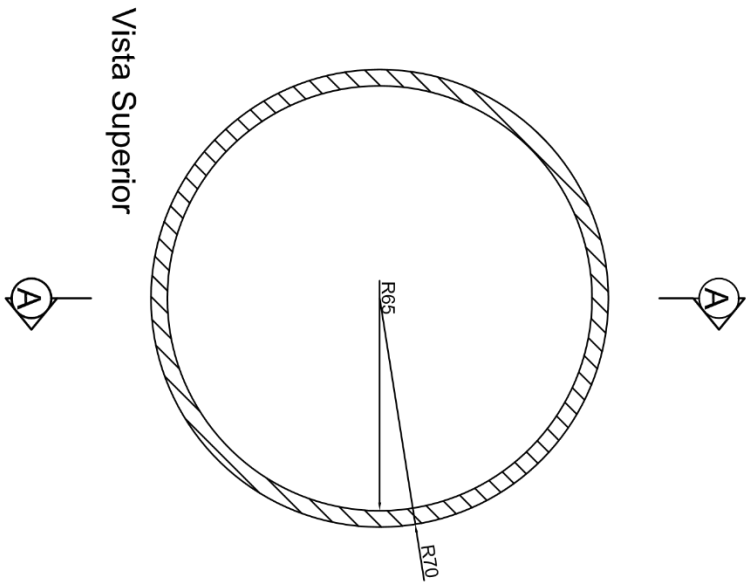
**PEÇA ADICIONAL-PISTÃO**

PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIN ESCALA
PERMÊTIMETRO PAREDE FLEXIVEL E CARGA VARIÁVEL	FECHA: 06 AGOSTO 2015
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	FOLHA: 09
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
CO-ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	08-Pisao

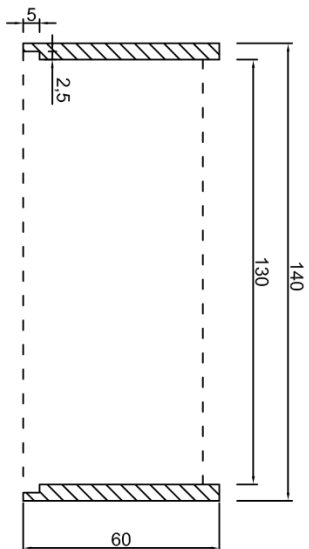




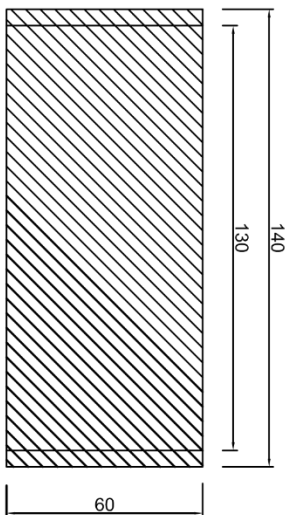
# Peça 1



Vista Superior

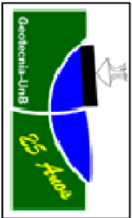


Seção A



Vista Frontal

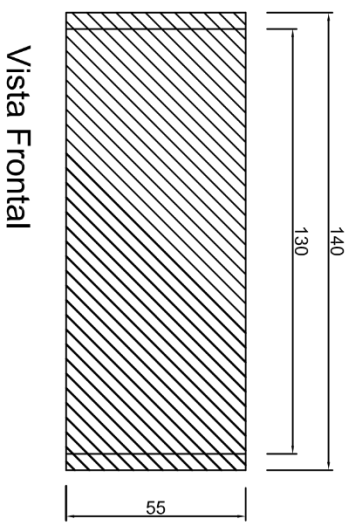
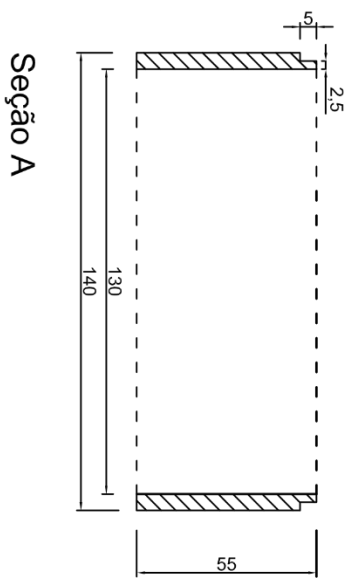
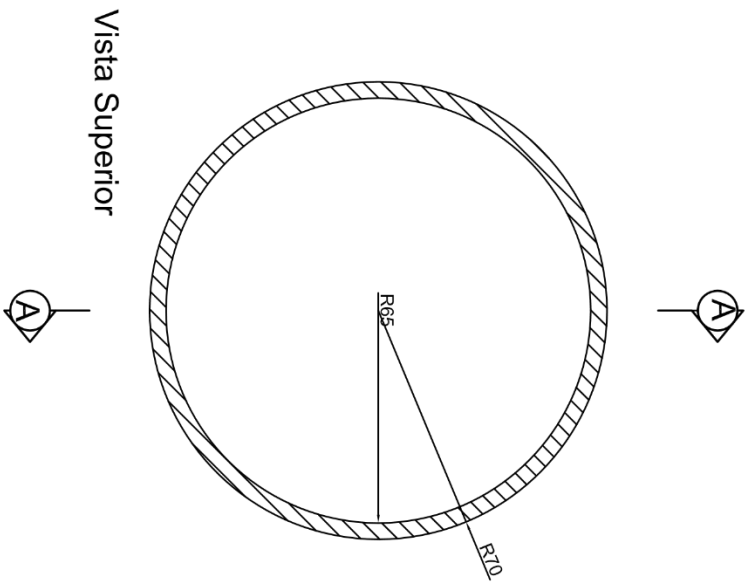
- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material das peças é Aço



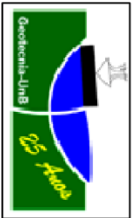
## TUBO COMPACTAÇÃO- PEÇA 1

PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SEM ESCALA
PERMEAVIMENTO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: V4401
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	07-Tubo Compactado

# Peça 2



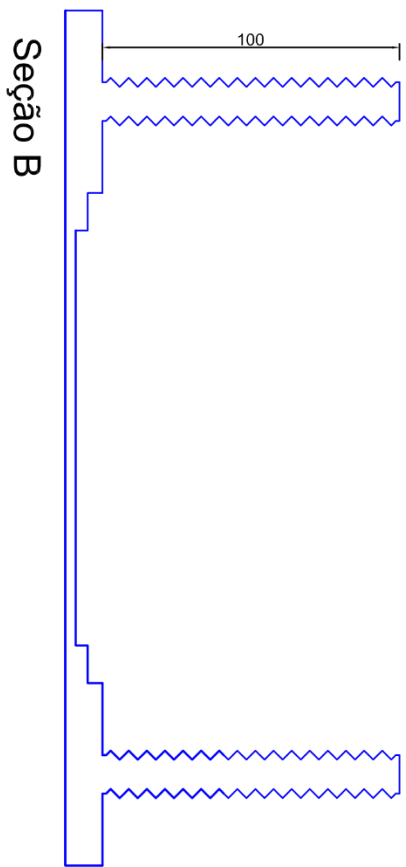
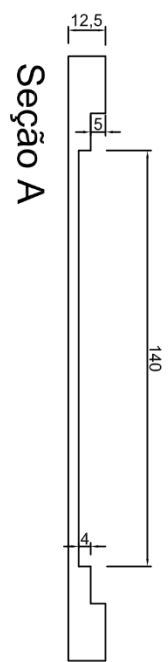
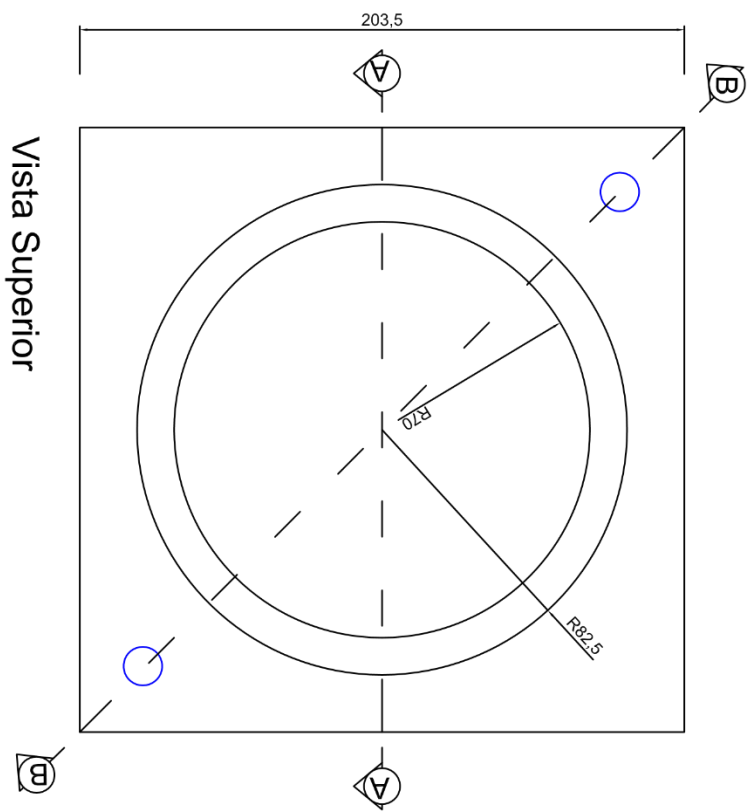
- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material das peças é Aço



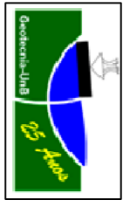
## TUBO COMPACTAÇÃO- PEÇA 2

PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIN ESCALA
PERÍMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: V442
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	07-Tubo Compactado

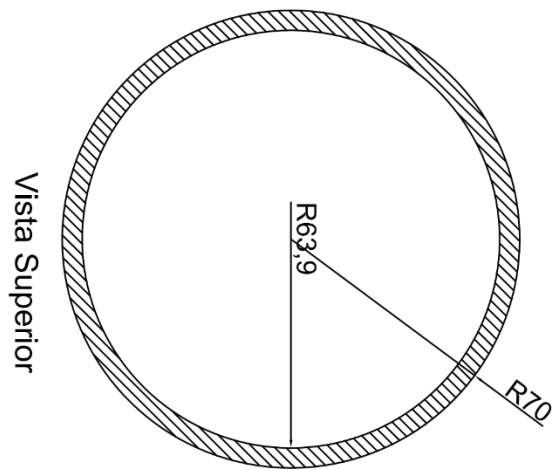
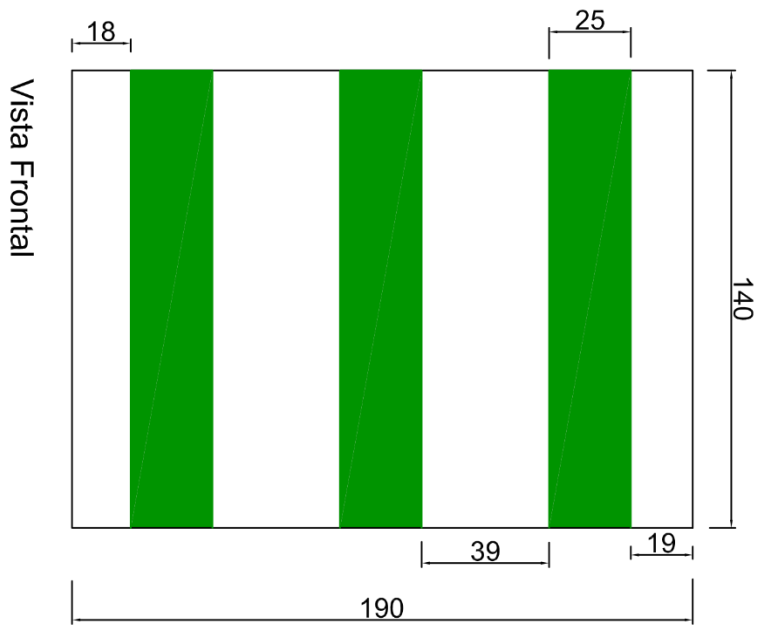
# Peça 3



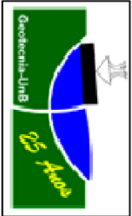
- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material das peças é Aço



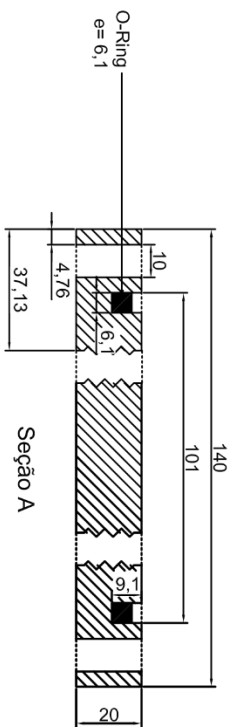
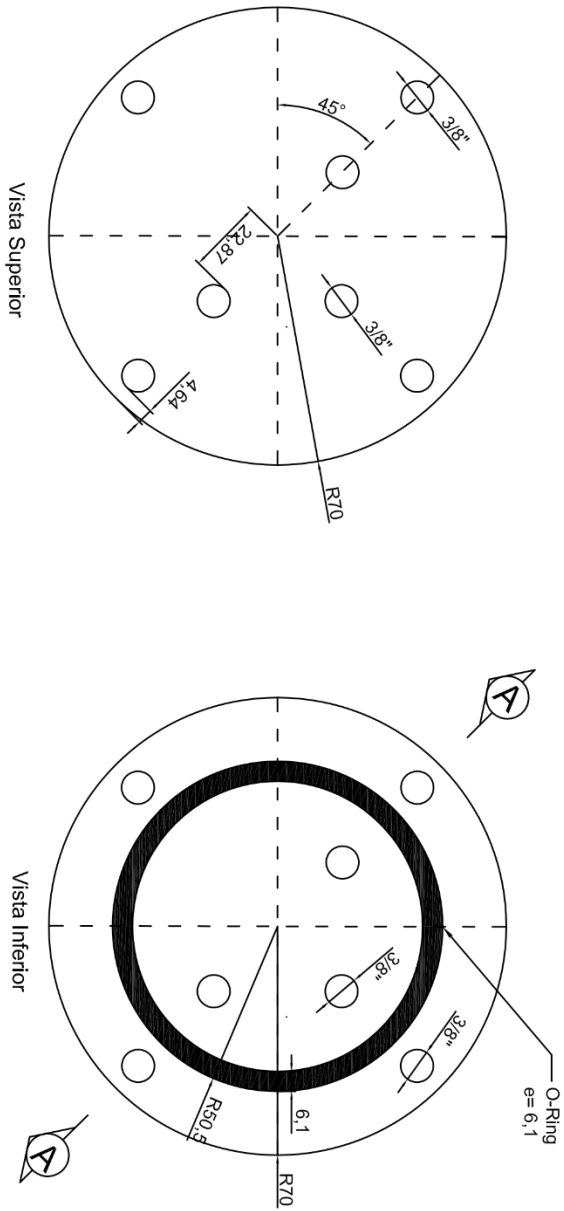
<b>TUBO COMPACTAÇÃO- PEÇA</b>	
3	PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA
PERMEÁMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	ESCALA: SEM ESCALA
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	FECHA: 20 JULHO 2014
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	CODIGO: V443
CO-ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	ARQUIVO DIGITAL: 07-Tubo Compactado



- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material da peça é Acrílico



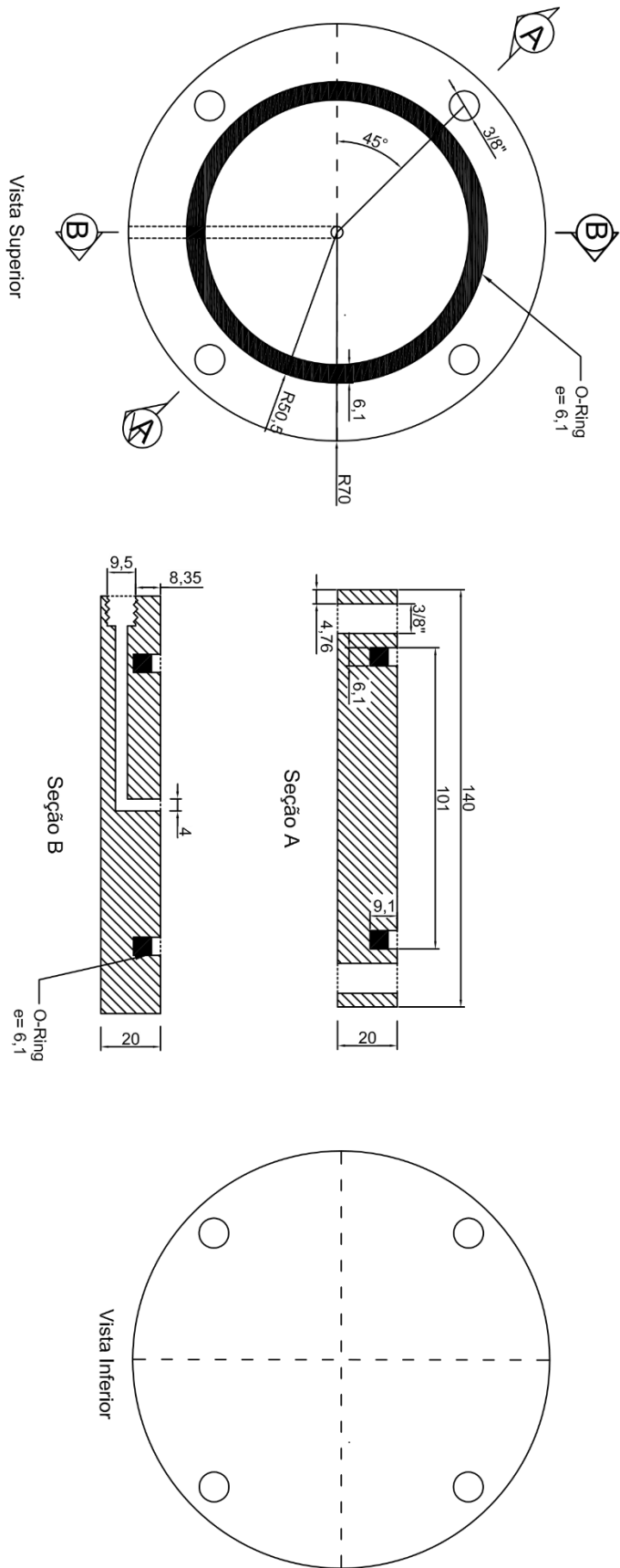
<b>CÂMARA INTERFACE</b>	
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SEM ESCALA
PERMEAVELTRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: Cam-02
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	08-Câmara Interface



- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material da peça é Acrílico

		<h2>TAMPA- CÂMARA INTERFACE</h2>	
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIN ESCALA		
PERMEAVELMETRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014		
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: Cam-02		
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:		
COORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	09- Camara Interface Base-Tampa		

Peça 1: Base Camara



Peça 2: Haste



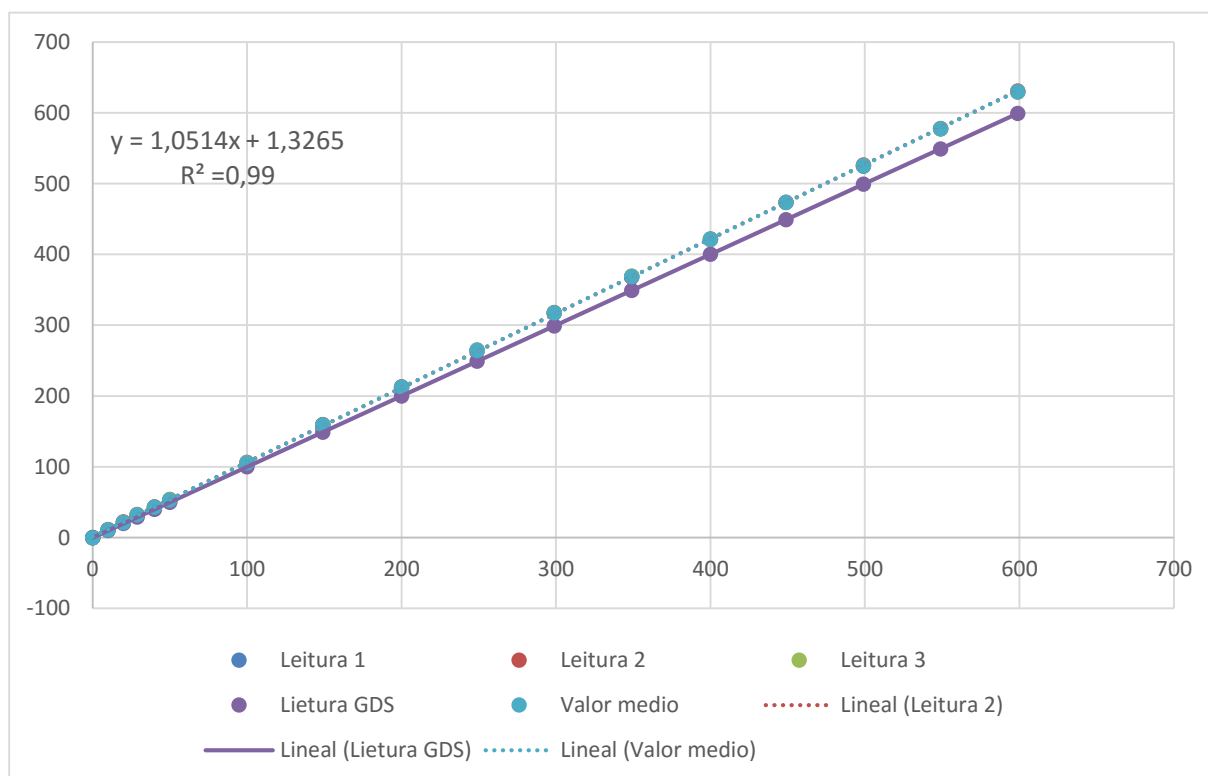
- Notas:
1. Todas as dimensões estão em mm
  2. O material da peça 1 é Açoilico.
  3. O material da peça 2 é Açoinox.
  4. A quantidade de haste é de 4

	
<b>BASE - CÂMARA INTERFACE</b>	
PROGRAMA DE POSGRADUAÇÃO EM GEOTECNIA	ESCALA: SIN ESCALA
PERMEAVELTRO DE CARGA VARIÁVEL E PAREDE FLEXÍVEL	FECHA: 20 JULHO 2014
ALUNO: CRISTINA MARTINEZ URIBE	CODIGO: Cam-03
ORIENTADOR: JUAN FELIX RODRIGUEZ	ARQUIVO DIGITAL:
CORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS	09-Camara Interface Base-Tampa

**APENDICE B- CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO**

**Tabela D0.1. Leituras calibração transdutor topo-carregamento**

<b>CARREGAMENTO</b>					
GDS	Leituras			Media	Desvio Padrão
	1	2	3		
0	-0,018	-0,546	-0,008	-0,191	0,308
10	10,847	11,15	10,873	10,957	0,168
20	21,41	22,035	21,13	21,525	0,463
29	31,638	32,475	31,928	32,014	0,425
40	42,42	43,364	42,614	42,799	0,499
50	52,43	53,684	53,206	53,107	0,633
100	103,138	106,488	105,907	105,178	1,790
149	158,965	159,44	158,638	159,014	0,403
200	212,01	212,77	212,223	212,334	0,392
249	264,73	262,97	264,646	264,115	0,993
299	316,94	317,787	316,895	317,207	0,503
349	368,957	367,588	369,143	368,563	0,849
400	421,015	421,6	421,365	421,327	0,294
449	473,114	473,44	473,306	473,287	0,164
499	524,547	526,338	525,442	525,442	0,896
549	577,159	577,686	577,144	577,330	0,309
599	629,467	630,47	629,464	629,800	0,580



**Figura D2. Calibração transdutor topo- carregamento**



Tabela D0.2. Leituras Calibração transdutor topo -descarregamento

DESCARREGAMENTO					
GDS	Leituras			Media	Desvio Padrão
	1	2	3		
599	629,5	629,998	629,518	629,672	0,282
549	577,38	576,706	576,88	576,989	0,350
499	525,403	526,03	525,073	525,502	0,486
449	472,75	473,934	473,079	473,254	0,611
400	421,204	421,98	421,066	421,417	0,493
349	368,472	369,66	368,794	368,975	0,614
299	316,613	317,643	316,614	316,957	0,594
249	264,736	265,403	266,512	265,550	0,897
200	212,277	212,928	212,03	212,412	0,464
149	158,916	159,645	158,645	159,069	0,517
100	106,405	106,98	106,08	106,488	0,456
50	53,335	54,113	53,064	53,504	0,545
40	42,842	43,712	42,507	43,020	0,622
29	32,138	32,773	31,844	32,252	0,475
20	21,59	22,05	22,294	21,978	0,357
10	11,054	11,723	10,785	11,187	0,483
0	0,158	0,886	-0,117	0,309	0,518

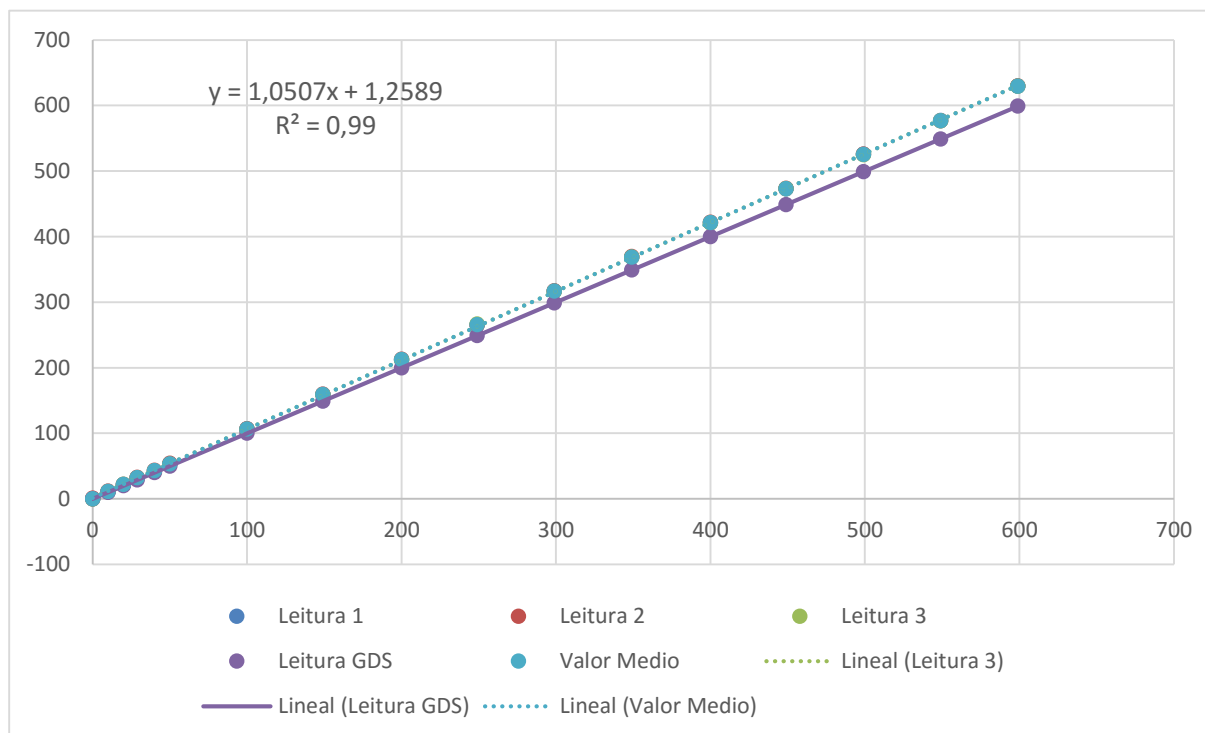
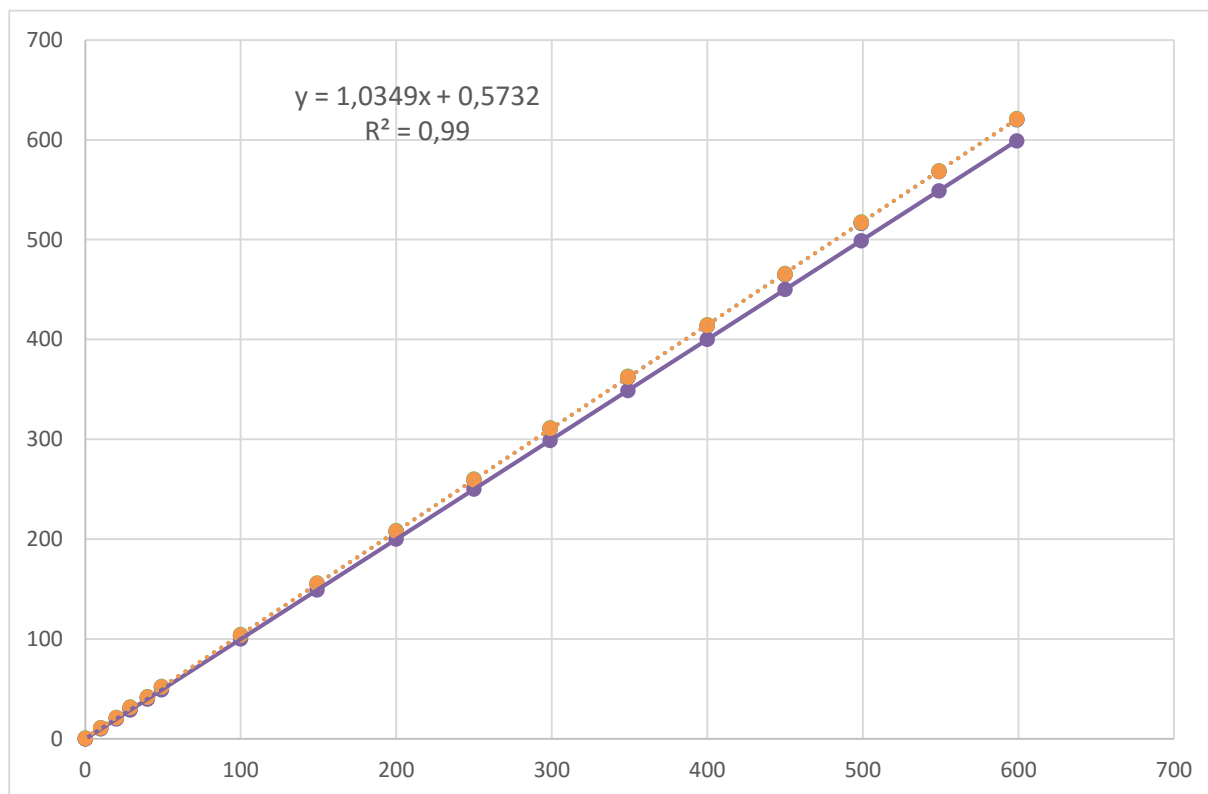


Figura D3. Calibração transdutor topo -descarregamento

**Tabela D0.3. Leituras calibração transdutor base- carregamento.**

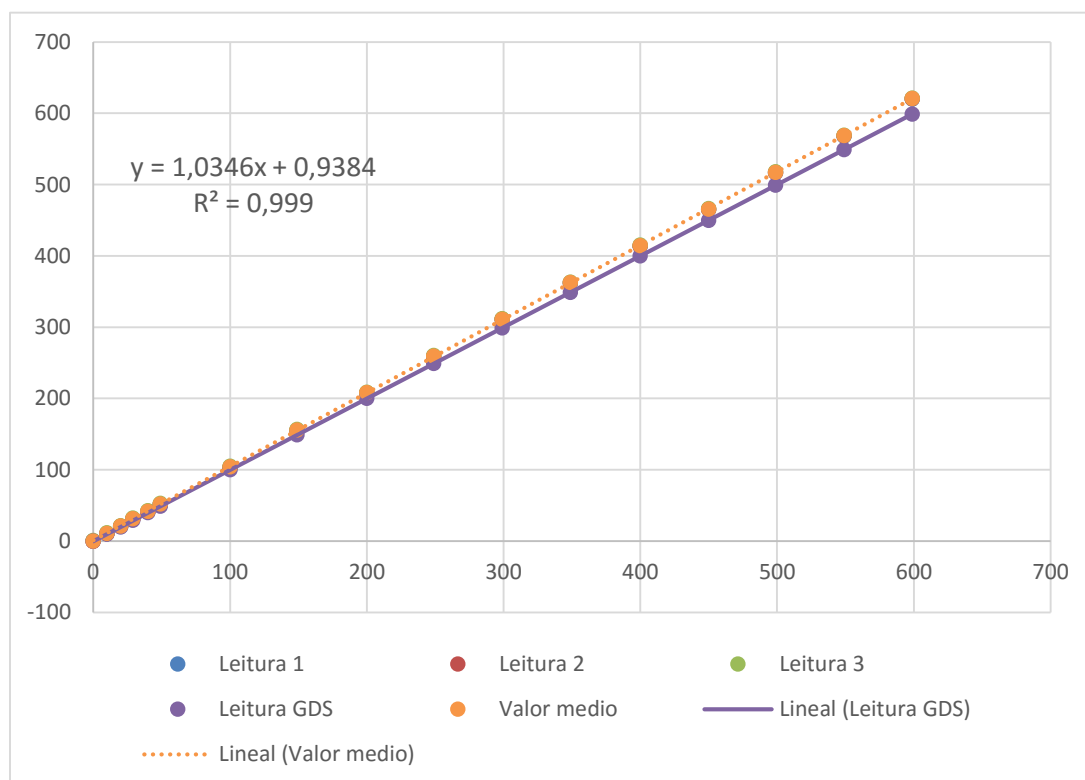
<b>CARREGAMENTO</b>					
<b>GDS</b>	<b>Leituras</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Media</b>	<b>Desvio Padrão</b>
0	0,083	0,018	0,988	0,376	0,538
10	10,583	10,582	11,438	10,868	0,506
20	20,793	20,96	21,61	21,121	0,445
29	31	31,076	32,028	31,368	0,577
40	41,445	41,483	42,533	41,820	0,596
49	51,797	51,883	52,753	52,144	0,542
100	103,357	103,693	104,688	103,913	0,682
149	154,864	155,157	156,264	155,428	0,728
200	207,369	207,705	208,7	207,925	0,665
250	259,085	259,205	260,288	259,526	0,636
299	310,545	310,776	311,71	311,010	0,599
349	362,071	362,04	363,16	362,424	0,626
400	413,63	413,97	414,858	414,153	0,609
450	464,96	465,29	466,05	465,433	0,577
499	516,244	516,947	517,788	516,993	0,751
549	567,982	568,3	569,082	568,455	0,559
599	619,98	620,41	621,438	620,609	0,687



**Figura D4. Calibração transdutor base- carregamento.**

**Tabela D0.4. Leituras calibração transdutor base- descarregamento.**

<b>DESCARREGAMENTO</b>					
<b>GDS</b>	<b>Leituras</b>			<b>Media</b>	<b>Desvio padrão</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		
599	619,874	620,315	621,225	620,6244	0,588
549	567,881	568,242	569,274	568,5486	0,570
499	516,587	516,776	517,825	517,1812	0,565
450	464,948	465,107	466,38	465,5764	0,644
400	413,635	413,79	415,15	414,2648	0,673
349	361,86	362,15	363,193	362,5392	0,647
299	310,485	310,975	312,053	311,1728	0,655
249	259,042	259,185	260,305	259,6182	0,611
200	207,528	207,693	208,819	208,0814	0,607
149	155,313	155,156	156,556	155,717	0,648
100	103,631	103,54	104,89	104,1084	0,649
49	51,633	51,63	52,976	52,1672	0,657
40	41,271	41,226	42,62	41,7978	0,680
29	30,866	30,8	32,23	31,3956	0,675
20	20,632	20,495	21,58	21,0588	0,583
10	10,387	10,365	11,574	10,8598	0,616
0	-0,149	-0,22	0,764	0,2166	0,534



**Figura D5. Calibração transdutor base- descarregamento.**

Tabela D0.5. Leituras calibração transdutor confinante- carregamento.

CARREGAMENTO					
GDS	Leituras			Media	Desvio Padrão
	1	2	3		
0	-0,033	0,428	0,228	0,208	0,231
10	10,296	10,803	10,568	10,556	0,254
20	20,235	20,987	20,63	20,617	0,376
29	30,416	30,793	30,804	30,671	0,221
40	40,46	41,065	40,773	40,766	0,303
50	50,7	51,235	51,038	50,991	0,271
100	101,234	101,746	101,469	101,483	0,256
149	151,462	151,944	151,58	151,662	0,251
200	202,636	202,975	202,8	202,804	0,170
249	252,979	253,135	253,103	253,072	0,082
299	303,099	303,309	303,183	303,197	0,106
349	353,196	353,403	353,462	353,354	0,140
400	403,517	403,802	403,87	403,730	0,187
449	453,633	453,817	453,75	453,733	0,093
499	504,035	504,14	504,194	504,123	0,081
549	554,023	554,058	554,147	554,076	0,064
599	603,197	604,91	604,737	604,281	0,943

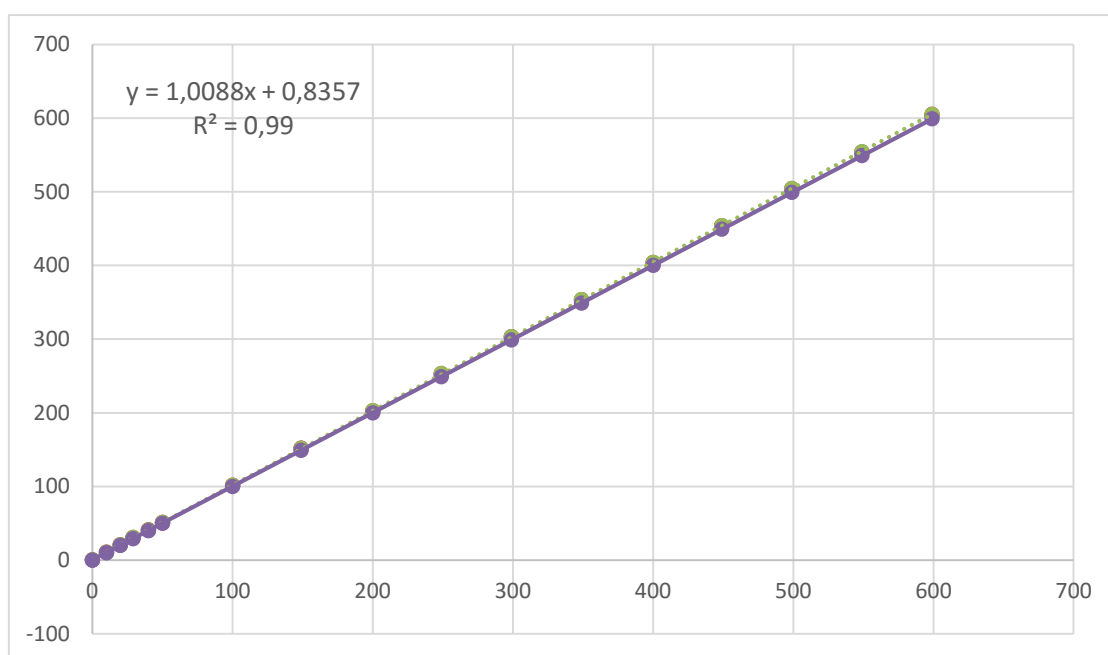


Figura D6. Calibração transdutor confinante-carregamento.

Tabela D0.6. Calibração transdutor confinante-descarregamento.

DESCARREGAMENTO					
GDS	Leituras			Media	Desvio Padrão
	1	2	3		
599	604,787	604,867	604,994	604,883	0,104
549	554,112	554,118	554,228	554,153	0,065
499	504,163	504,113	504,11	504,129	0,030
449	454,046	454,02	453,94	454,002	0,055
400	403,88	403,948	403,9	403,909	0,035
349	353,559	353,68	353,54	353,593	0,076
299	303,43	303,384	303,533	303,449	0,076
249	253,317	253,333	253,358	253,336	0,021
200	203,128	203,15	203,358	203,212	0,127
149	152,052	152,056	152,03	152,046	0,014
100	102,37	101,892	101,722	101,995	0,336
50	51,163	51,178	50,78	51,040	0,226
40	41,026	41,04	40,99	41,019	0,026
29	30,848	30,88	30,89	30,873	0,022
20	20,704	20,93	20,705	20,780	0,130
10	10,734	10,86	10,78	10,791	0,064
0	0,468	0,496	0,454	0,473	0,021

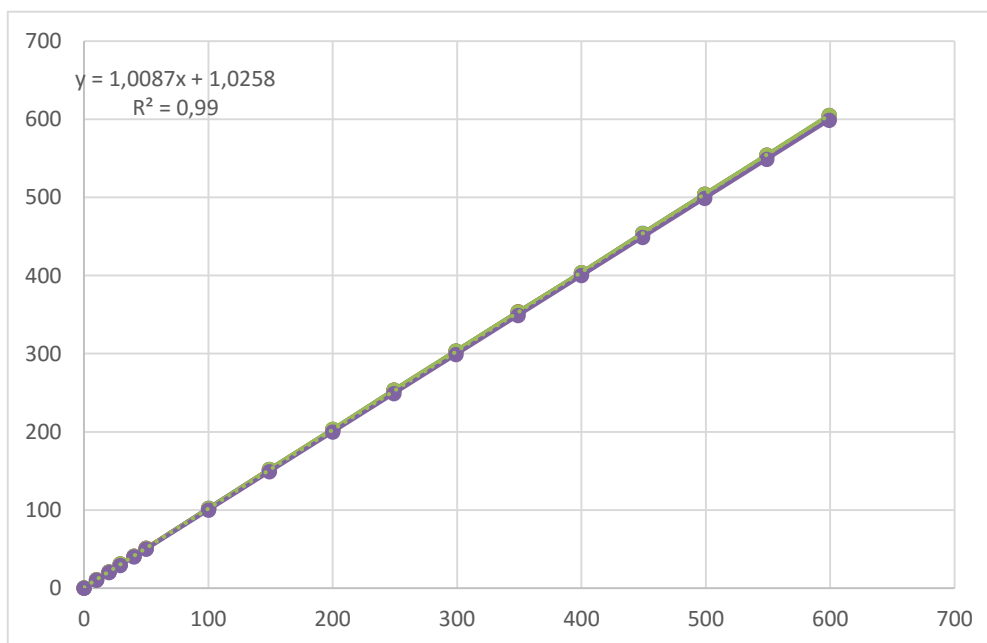


Figura D7. Calibração transdutor confinante-descarregamento.