



Kathia Cecília López Supo

**Desenvolvimento de Permeâmetro de vazão constante de
campo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior.

Rio de Janeiro, 07 de novembro de 2008



Kathia Cecília López Supo

Desenvolvimento de Permeâmetro de vazão constante de campo

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Tavares Araruna Junior
Presidente/Orientador
PUC - Rio

Prof. Fernando Antonio M. Marinho
USP

Prof. George de Paula Bernardes
UNESP

Prof. Sergio Tibana
UENF

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de novembro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Kathia Cecília López Supo

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidad Ricardo Palma (Lima-Perú) em 2004. Trabalhou na área de projetos, construção e supervisão de obras de Mineração. Ingressou em 2006-II no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa Geotecnia Experimental

Ficha Catalográfica

Kathia Cecília López Supo

Supo, Kathia Cecília López

Desenvolvimento de Permeâmetro de vazão constante de campo / Kathia Cecília López Supo; orientador: Jose Tavares Araruna Junior. – 2008.

v., 92. : il. ; 29,7 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Teses. 2. Permeâmetro. 3. Desenvolvimento do Permeâmetro de Cravação. 4. Avaliação e desempenho do Permeâmetro de Cravação. 5. Conclusões e Sugestões. I. Araruna, Jose Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

A meus queridos pais, Felipe López e Erenia Supo.
Ao Emerson Figueroa por ter me dado a felicidade.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por estar sempre quando mais o necessite, e por todas as graças recebidas.

Ao Professor José Araruna, pela orientação, amizade e ajuda para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Patrício pela amizade e a ajuda brindada em todo momento para levar a fim esta pesquisa.

Ao os meus queridos pais Felipe e Erenia pelo grande apoio, confiança e amor, graças por acreditar nos meus sonhos e pela ajuda para lograr meus objetivos.

Agradeço ao Emerson meu esposo, por tudo o apoio, compreensão e por ter sido minha fonte de inspiração e motivação.

As minhas irmãs, Angélica, Patrícia e Carolina, pelo apoio e confiança.

Aos meus queridos sobrinhos, Luciana, Oliver e Samantha

Aos meus sogros Benito e Domitila, pelo apoio e ajuda para lograr este objetivo.

Aos Professores do curso de mestrado da PUC-Rio, pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os amigos e companheiros de estudos de Engenharia Civil da PUC-Rio, e de maneira muito especial as minhas queridas amigas Gladys, Carmen e Gricel, pelos momentos compartilhados que sempre estarão guardados na minha memória.

A meus amigos David e Gustavo pelo apoio e amizade brindada durante estes anos.

Aos funcionários do ITUC, Marquez, Braiz e Paulo pela amizade dispensada e a grande ajuda na confecção da sonda.

Aos funcionários do laboratório de Geotecnia, William, Davis e Amaury, pela ajuda e assistência dispensada.

À CAPES pela ajuda financeira indispensável ao desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Kathia Cecília López Supo, José Tavares Araruna Junior. **Desenvolvimento de Permeâmetro de vazão constante de campo**. Rio de Janeiro, 2008. 92p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação descreve o desenvolvimento de um equipamento destinado a determinar a condutividade hidráulica de meios porosos saturados *in situ*. O permeâmetro consiste em uma sonda que emprega o método da vazão constante. Após sua inserção pelo modo de cravação. Uma bomba de seringa instalada na superfície do terreno é utilizada para aplicar uma vazão constante enquanto que a carga hidráulica induzida no meio é medida através de um transdutor de pressão piezoresistivo instalado no corpo da sonda. O equipamento permite o escoamento das linhas de drenagem e de medição de carga hidráulica a partir da superfície possibilitando a saturação do meio poroso após a cravação da sonda bem como minimiza as incertezas associadas à medição de pressão. Esta última é alcançada através de um transdutor diferencial de pressão com uma faixa de trabalho de 10kPa que possibilita medições de poropressões bem próximas a zona de injeção. Esta característica permite a realização de ensaios num tempo curto e minimiza o problema de compatibilidade de fluidos decorrente do processo de injeção.

Palavras-chave

Permeâmetro, condutividade hidráulica.

Abstract

Kathia Cecília López Supo, José Tavares Araruna Junior. **Development of a constant rate of flow field permeameter.** Rio de Janeiro, 2008. 92p. M.Sc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis describes a piece of equipment developed to determine the hydraulic conductivity of saturated porous media. The permeameter consists of a pushed in probe and employs the constant flow rate method. A syringe pump installed on the surface is used to develop a constant rate of flow whereas a piezoelectric transducer installed in the probe's body measures the induced change in hydraulic head. The great innovation in this device consists on its ability of saturating all of its drainage lines allowing the media to be saturated and minimizing the errors of pressure measurements. Pressure measurement is carried out using a 10kPa differential pressure transducer that enables porepressure to be measured close to the injection zone. This characteristic enables shorter tests to be carried out and minimize problems associated to fluid compability

keywords

Permeameter, hydraulic conductivity.

Sumário

1	Introdução	17
2	Permeâmetro	19
2.1.	Tipo de Permeâmetro	19
2.1.1.	Permeâmetro de Guelph	19
2.1.1.1.	Descrição do ensaio com o Permeâmetro de Guelph	20
2.1.2.	Ensaio de Lefranc	23
2.1.3.	<i>Slug Test</i>	26
2.1.3.1.	Descrição do <i>Slug Test</i>	26
2.1.3.1.1.	Método de Hvorslev	31
2.1.3.1.2.	Método de Bouwer e Rice	33
2.2.	Equipamentos cravados	36
2.2.1.	Piezocone	36
2.2.2.	Permeâmetro Cravado (DPP)	44
2.2.2.1.	Considerações sobre o Emprego do Permeâmetro Cravado	46
3	Desenvolvimento do Permeâmetro	48
3.1.	Características do material de confecção	49
3.1.1.	Aço Inox	49
3.2.	Projeto do permeâmetro	50
3.3.	construção do permeâmetro	51
3.4.	Detalhes das peças constituintes	56
3.4.1.	Ponta cônica	56
3.4.2.	Portas de Drenagem	57
3.4.3.	Base do Permeâmetro	58
3.4.4.	Placas Porosas	60
3.5.	Dispositivos de medição empregados	62
3.5.1.	Sensor de Pressão	62
3.5.1.1.	Cabos elétricos e convenção de cores	63

3.5.2. Calibração do transdutor Diferencial	64
3.5.3. Bomba de injeção	66
3.5.4. Calibração do Transdutor de Deslocamento	67
3.6. Aquisição de sinais	68
4 Avaliação do Desempenho do Permeâmetro Cravado	69
4.1. Procedimento do ensaio	69
4.2. Programa Experimental	71
4.2.1. Ensaios de laboratório	72
4.2.1.1. Resultados dos ensaios de laboratório	72
4.2.2. Ensaios no campo experimental II PUC-RIO	75
4.2.2.1. Resultados dos ensaios realizados no campo experimental	75
5 Conclusões	79
6 Sugestões	81
7 Referências Bibliográficas	83

Lista de figuras

Figura 2.1- Permeâmetro de Guelph sendo empregado em um estudo hidrogeológico em Santos Dumont (MG)	20
Figura 2.2- Esquema do Ensaio de Lefranc (Puertos del Estado,1994)	23
Figura 2.3- Proposta de dispositivo de Custodio (1983)	25
Figura 2.4- Detalhe de um ensaio slug test realizado em uma campanha hidrogeológica em São Paulo	26
Figura 2.5- Slug Test, Weight e Wittman	27
Figura 2.6- Slug In, subida inicial e medidas de descensos da água Navfac, 1981.	28
Figura 2.7- Slug Out, descenso inicial e medidas de subidas da água (Navfac, 1981).	28
Figura 2.8 - Método pneumático proposto por McLane et al. (apud, Butler 2007)	30
Figura 2.9- Poço e Piezômetro, Método de Hvorlev (1949)	32
Figura 2.10- Esquema do ensaio de slug test, método de Bouwer e Rice (1967)	33
Figura 2.11- Parâmetros adimensionais A, B, C, Bouwer	35
Figura 2.12- Cargas numa perfuração como uma função de forma do tempo da reta de melhor ajuste durante a parte inicial do teste, mas eventualmente devidamente frente à reta ajusta. Bouwer	35
Figura 2.13- Desenho esquemático de CPTU (Davies e Campanella, 1995)	37
Figura 2.14 – Sistema de cravação	39
Figura 2.15– Sistema de cravação montando em um caminhão	39
Figura 2.16 – Aquisição automática dos parâmetros de interesse	40
Figura 2.17 – Piezocone com medição de poropressão na posição U2	41
Figura 2.18 Gráfico de dissipação de poropressões segundo a posição da pedra porosa, P.W.Mayne, 2002.	42
Figura 2.19- posições as pedra porosa U1 e U2.	42

Figura 2.20- Representação esquemática do permeâmetro cravado (Dietrich et al., 2007)	44
Figura 2.21 – Gráfico típico de um ensaio de vazão constante (Butler et al.,2007)	46
Figura 3.1 – Permeâmetro da Geoprobe Systems	49
Figura 3.2 Detalhe da posição do transdutor	50
Figura 3.3 Dimensões do Permeâmetro de cravação	52
Figura 3.4 Detalhe da ponta cônica de 30° do Permeâmetro de cravação.	51
Figura 3.5 Diagrama esquemático do permeâmetro de cravação	52
Figura 3.6 Detalhe das partes constituintes do Permeâmetro de cravação	52
Figura 3.7 Detalhe da perfuração do furo longitudinal para dar acesso a transdutor de pressões	53
Figura 3.8 Detalhe do furo onde é colocado o transdutor diferencial	53
Figura 3.9 Perfuração do anel complementar	54
Figura 3.10 Perfuração do anel complementar	54
Figura 3.11 detalhe da placa porosa posição 9	54
Figura 3.12 Detalhe dos parafusos e do furo para a passagem dos fios do transdutor	55
Figura 3.13 Permeâmetro confeccionado com aço 316	55
Figura 3.14 Detalhe da confecção da ponta cônica	56
Figura 3.15 Detalhe da confecção da rosca da ponta cônica	56
Figura 3.16 Detalhe da rosca e da ponta cônica	57
Figura 3.17 Detalhe da porta de drenagem de Ø 4x3 mm	57
Figura 3.18 Detalhe da porta de drenagem de Ø4x3 mm contendo a malha no interior.	57
Figura 3.19 Detalhe da malha de 0.425 x 0.425 mm .	58
Figura 3.20 Detalhe dos parafusos empregados para as entradas de água	59
Figura 3.21 Detalhe do torneamento dos furos para a localização dos parafusos.	59
Figura 3.22 Detalhe dos furos para a localização dos parafusos e canais de água.	59
Figura 3.23 Detalhe a luva confeccionada.	60
Figura 3.24 Detalhes dos diâmetros das placas porosas localizadas nas posições 1,2,3.	60

Figura 3.25 Detalhes da localização da pedra porosa na posição 1	61
Figura 3.26 Detalhes da localização da pedra porosa na posição 2	61
Figura 3.27 Detalhes da localização da pedra porosa na posição 7 segunda a localização mostrada na Figura 3.5.	61
Figura 3.28 Transdutor serie PD -10L , KELLER	62
Figura 3.29 Sistema interno do transdutor da serie PD-10L, KELLER	62
Figura 3.30 convenção de cores da montagem do transdutor diferencial (KELLER)	63
Figura 3.31 Cabos elétricos sendo conectados aos fios do transdutor	63
Figura 3.32 Exemplo ilustrativo dos cabos elétricos já conectados.	64
Figura 3.33 Bomba de injeção Syringe Pumps.	66
Figura 3.34 Instrumentos utilizados para a calibração	64
Figura 3.35 Resultados da calibração do transdutor de pressão PD10L, efetuado no laboratório PUC.	65
Figura 3.36 montagem do parafuso micrométrico, transdutor de deslocamento e Data Logger.	67
Figura 3.37 Curva de Calibração do LSCT	67
Figura 3.38 Data Logger ALMEMO.	70
Figura 4.1 Localização do campo experimental II	71
Figura 4.2 Variação da pressão diferencial durante o ensaio realizado com a vazão de injeção de 0.000167 cm ³ /s	73
Figura 4.3 Variação da carga hidráulica e da injeção para o ensaio com vazão de 0.000167 cm ³ /s	74
Figura 4.4 Variação da pressão diferencial durante o ensaio realizado com a vazão de injeção de 0.00167 cm ³ /s	75
Figura 4.5 Variação da carga hidráulica e da injeção para o ensaio com a vazão de 0.00167 cm ³ /s	77
Figura 4.6 Variação da pressão diferencial durante o ensaio realizado com a vazão de injeção de 0,0167 cm ³ /s	78
Figura 4.7 Variação da carga hidráulica e da injeção para o ensaio com a vazão de 0.0167 cm ³ /s	78

Lista de tabelas

Tabela 1 Valores de α segundo o tipo de solo, Soto,(1999).	22
Tabela 3.1 – Parâmetros de calibração do transdutor diferencial de pressão	65
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de carga variável para a areia (SP)	72
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios de carga variável para o material argilo – arenoso.	72
Tabela 4.3 Resultados dos ensaios realizados com o permeâmetro na areia	72
Tabela 4.4 Resultados dos ensaios realizados com o permeâmetro na areia	74
Tabela 4.5 Resultados dos ensaios realizados com o Permeâmetro	76

Lista de Símbolos

k_s	Condutividade hidráulica saturada
Q	Vazão do regime permanente ou vazão injetada
R	razão da vazão constante obtida durante os ensaios
A	área do reservatório do Permeômetro utilizado (36.19 cm ²).
H	altura da carga hidráulica,
a	diâmetro do orifício aberto pelo trado no solo
α	valores sugeridos respeito ao solo a ensaiar
C	fator de forma, que depende da relação H/a e do tipo de solo.
h_m	altura da água no interior da sondagem, por acima do nível freático.
L	longitude da zona filtrante (m).
d	diâmetro da sondagem
r_c	raio da tubulação (cm)
R_e	raio efetivo do slug (cm)
t	tempo do acréscimo instantâneo inicial (s)
L	comprimento do filtro
k_r	condutividade hidráulica,
r_w	raio do filtro,
t	tempo do acréscimo instantâneo inicial (s)
H_0	altura de drenagem num tempo zero $t=0$,
H_t	altura de drenagem num tempo zero $t=t$,

q_c	resistência a ponta cônica
f_s	atrito lateral
U	valores de poropressão
u_t	poro-pressão medida no tempo t ,
u_i	poro-pressão medida no tempo $t=0$,
u_0	poro-pressão hidrostática
T^*_{50}	fator do tempo correspondente a 50% da dissipação teórica
r	raio do cone
I_r	índice de rigidez do solo (se não se tem o valor, adotar 100)
t	medida do tempo durante a dissipação (50% de equalização)
C_h	coeficiente de adensamento horizontal,
γ_w	peso específico da água,
D'	modulo oedométrico
M	modulo de confinamento drenado do solo
mv	modulo de variação volumétrica do ensaio de compressão edométrica,
q_c	resistência da ponta do cone,
α	fator empírico que geralmente varia de 1,5 a 4,0
D_r	densidade relativa.
r_1 e r_2	distâncias entre o ponto de imposição de fluxo e os pontos de medição da poropressão.