



**Avaliação da Condutividade Hidráulica das Unidades
Geológico-Geotécnicas de Santa Maria (RS) com a Utilização de Piezômetros**
Evaluation of the Hydraulic Conductivity of the
Geological-Geotechnical Units of Santa Maria (RS) With the Use Piezometers

Rinaldo J.B. Pinheiro¹; Andréa Valli Nummer²; Magnos Baroni¹ & Ildomar Tavares Schneider³

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Av. Roraima, 1000, 97100-900, Santa Maria, RS.

² Universidade Federal de Santa Maria, Pós-Graduação em Geografia, Centro de Ciências Naturais e Exatas,
Cidade Universitária, Av. Roraima, 1000, 97100-900, Santa Maria, RS

³ Universidade Federal do PAMPA, Rua Luiz Joaquim de Sá Brito - Promorar, s/n, 97650-000, Itaqui – RS.
E-mails: rinaldo@ufsm.br; a.nummer@gmail.com; magnos.baroni@ufsm.br; ildomartavares@unipampa.edu.br

Recebido em: 29/01/2018 Aprovado em: 14/03/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_212_221

Resumo

Determinou-se a condutividade hidráulica saturada das Unidades Geotécnicas sedimentares de Santa Maria/RS, utilizando a técnica de piezômetro de Casagrande. Essa técnica foi empregada para resolver problemas de alteração da estrutura, amolgamento, fuga lateral da água e variabilidade de resultados obtidos através de outros métodos descritos na literatura. As Unidades Geotécnicas mostraram diferentes valores de condutividade hidráulica que ocorrem, principalmente, pela variação granulométrica, cimentação e estruturas sedimentares desses materiais. Valores baixos de condutividade hidráulica foram obtidos para a Formação Santa Maria (exceto Arenito Basal) e mais elevados, para Depósitos Coluvionares e Fluviais. Os procedimentos adotados para os ensaios foram satisfatórios em relação ao tempo de ensaio e valores obtidos, confirmando e quantificando as informações contidas na Carta Geotécnica de Santa Maria (RS). Os resultados mostram que, em termos ambientais e hidrogeológicos, a infiltração de águas nos aquíferos apresenta diferentes condições de recarga, o que deve ser considerado na avaliação e na gestão das reservas de águas subterrâneas da região.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica; permeabilidade; piezômetros

Abstract

The saturated hydraulic conductivity of the sedimentary Geotechnical Units of Santa Maria/RS was determined using the Casagrande piezometer technique. This technique was used to solve problems of structure alteration, bending, lateral leakage of water and the variability of results obtained through other methods described in the literature. The Geotechnical Units showed different values of hydraulic conductivity that occur mainly by the granulometric variation, cementation and sedimentary structures of these materials. Low values of hydraulic conductivity were obtained for the Santa Maria Formation (except Basal Sandstone) and higher for Coluvian and Fluvial Reservoirs. The procedures adopted for the tests were satisfactory in relation to the test time and values obtained, confirming and quantifying the information contained in the Geotechnical Chart of Santa Maria (RS). The results show that, in environmental and hydrogeological terms, the infiltration of water into aquifers presents different recharging conditions, which should be considered in the evaluation and management of groundwater reserves in the region.

Keywords: Hydraulic conductivity; permeability; piezometers

1 Introdução

A condutividade hidráulica saturada é uma das propriedades de maior relevância para estudos de movimento de água, substâncias químicas e solutos no solo. Esse coeficiente representa uma das propriedades do solo de mais alta variabilidade e a sua determinação depende de vários atributos do solo, principalmente peso específico natural, porosidade total, macro e microporosidade (Mesquita & Moraes, 2004). Além delas, a escolha do tipo de método de ensaio também pode influenciar os valores dos resultados obtidos (Olson & Daniel, 1981; Daniel, 1994; Nagy *et al.*, 2013). Segundo Reichardt (1996), dentre as variáveis que influenciam o fluxo de água, a condutividade hidráulica destaca-se, sendo um parâmetro que representa a facilidade com que o solo/rocha transmite água. Dessa forma, o valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quanto o solo/rocha sedimentar encontra-se saturado e é definido como condutividade hidráulica saturada.

Este artigo tem como objetivo apresentar a metodologia de obtenção e determinação da condutividade hidráulica saturada com a utilização do piezômetro de Casagrande e a sua aplicação nas rochas sedimentares e depósitos superficiais que compõem Unidades Geotécnicas da cidade de Santa Maria (RS), definidas por Maciel Filho (1990), avaliando a eficácia do método empregado.

2 Metodologia

2.1 Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada *In Situ*

Os ensaios de campo têm como objetivo determinar a condutividade hidráulica das rochas e dos depósitos de solos naturais. Esses ensaios têm como grande vantagem envolverem uma massa de solo representativa das condições *in situ*, levando em consideração a heterogeneidade e a anisotropia dos materiais.

Os piezômetros são instrumentos amplamente utilizados na prática de engenharia geotécnica. A determinação do coeficiente de condutividade hidráulica, por meio do piezômetro do tipo Casagrande, apresenta como principal vantagem a facilidade de montagem e a rápida execução. Os piezômetros podem ser instalados em solo escavado ou podem ser cravados diretamente no solo. A utilização de pie-

zômetros cravados é desaconselhada, já que pode ocorrer amolgamento do solo em volta da ponteira de cravação (Tavenas *et al.*, 1983, 1990).

Neste estudo, os ensaios foram realizados com piezômetros instalados a partir de perfurações a trado ou em furos de sondagens SPT em diferentes profundidades e diâmetros (D) variando entre 6,5 a 8,5cm. Os ensaios foram executados da seguinte maneira: após a realização do furo, foram instaladas tubulações de PVC com 3cm de diâmetro; as ponteiros filtrantes (base do tubo) tiveram comprimento (L) variável entre 15cm e 100cm, com ranhuras a cada 2cm. O espaço entre a parede do furo e a ponteira filtrante foi preenchido com material granular (pré-filtro), constituído de uma areia grossa selecionada. Acima do trecho correspondente ao pré-filtro, executou-se um selamento com uma mistura de bentonita e água. Em furos profundos, quando necessário, completou-se o restante do furo com solo local.

Apesar de existirem várias metodologias de aplicação de ensaios para avaliação da permeabilidade (ABGE, 2013) através de sondagens, poços e cavas, este trabalho propõe-se a apresentar o ensaio de condutividade hidráulica com o piezômetro de Casagrande em furos previamente escavados a trado ou à percussão. O ensaio tem início após a completa expansão da bentonita, sendo garantido o perfeito selamento. Basicamente, o procedimento do ensaio consiste na medição do tempo necessário para que infiltre um volume conhecido de água no solo, mantendo-se a carga hidráulica constante no interior do furo (ensaio de carga constante) ou, alternativamente, a medição do tempo necessário para a carga hidráulica cair de um nível H_1 para um nível H_2 (ensaio de carga variável). Diferentemente do ensaio *slug test* que só pode ser realizado abaixo do nível de água, o ensaio com piezômetro pode ser realizado tanto acima do nível de água (solo não saturado) como abaixo.

2.2 Interpretação do Ensaio com Piezômetro

A equação para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica a partir dos resultados de ensaios com piezômetros foi apresentada por Hvorslev (1951). A Figura 1 apresenta os parâmetros geométricos necessários para o cálculo

da condutividade hidráulica em ensaios com carga hidráulica constante e variável. Para uma vazão q (vazão estabilizada) no piezômetro, sob uma carga hidráulica constante H_c , propõe-se a utilização da equação 1 e, para o ensaio realizado com carga hidráulica variável, utiliza-se a equação 2 (Hvorslev, 1951).

$$k = \frac{q}{F \cdot H_c} \quad (1)$$

$$k = \frac{A}{F} \cdot \frac{\ln(H_1 / H_2)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Ambas as equações requerem o conhecimento da relação entre a carga hidráulica aplicada no interior do furo e a vazão medida durante o ensaio, além do fator de forma da ponteira (F) que foi adotado aquele que corresponde à solução de Hvorslev (1951) para um pré-filtro em solo uniforme. O fator de forma F (equação 3) é função da geometria do piezômetro e do tipo de ensaio (carga hidráulica constante ou variável), que representa a solução analítica fechada da equação de Laplace para um elipsóide equivalente contido na região cilíndrica do filtro granular (*cylindrical injection zone*). A utilização dessas equações pressupõe que o solo seja homogêneo e isotrópico.

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left[\frac{m \cdot L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{m \cdot L}{D}\right)^2}\right]} \quad (3)$$

onde: k = condutividade hidráulica (m/s); q = vazão estabilizada (m^3/s); H_c = carga hidráulica constante (m); m = parâmetro que quantifica as variações do Fator de Forma; H_1 e H_2 as cargas hidráulicas obtidas nos tempos t_1 e t_2 respectivamente; d = diâmetro do tubo (m); D = diâmetro do filtro (m); L = altura do filtro (m); A = seção transversal do filtro (m^2); F = fator de forma.

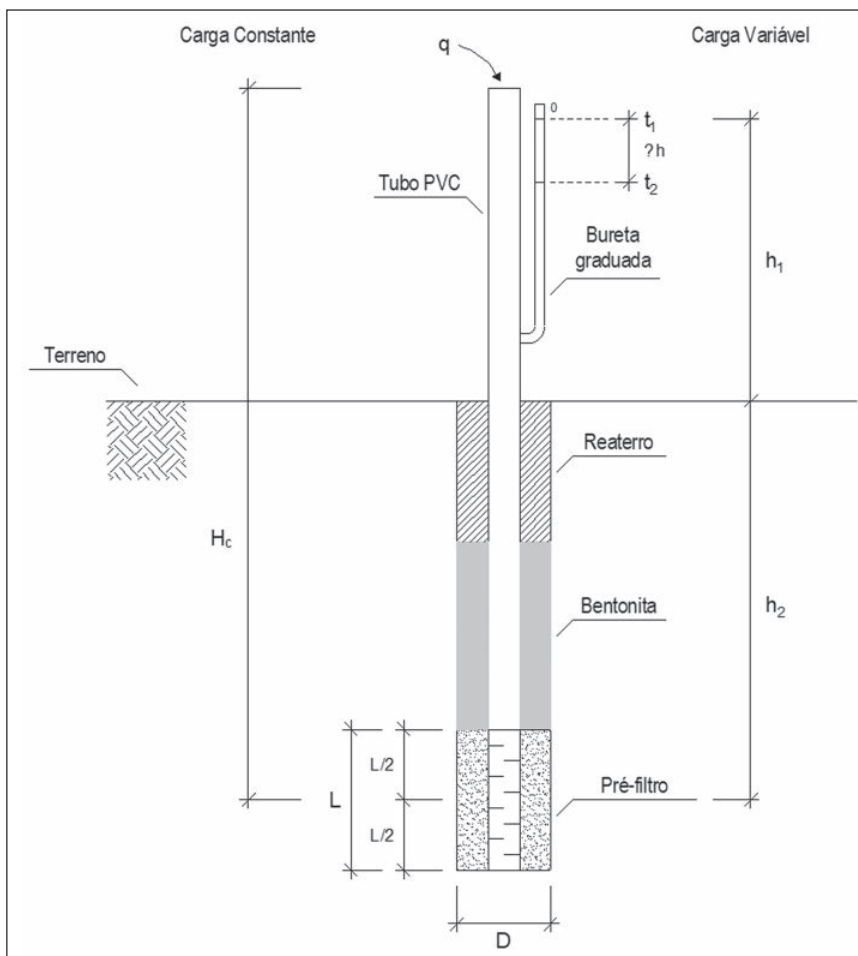


Figura 1 Esquema representativo para entendimento e cálculo da condutividade hidráulica com a técnica do piezômetro.

O fator de forma F tem sido objeto de consideráveis discussões na literatura geotécnica, sendo que diversos autores (e.g. Hvorslev, 1951; Wilkinson, 1968; Brandt & Premchitt 1980) propuseram formulações para a sua obtenção. O parâmetro “m” (ver equação 3) quantifica as diferenças propostas para o fator F, que varia entre 1,0 e 1,5. Portanto, ao adotar-se uma relação entre comprimento e diâmetro do filtro igual a $L/D=5$, essas diferenças são mais reduzidas independentemente da solução teórica adotada e, adotando o parâmetro $m=1$, correspondente à formulação sugerida por Hvorslev (1951).

Chapuis (1989) avaliou diferentes fatores de forma propostos por métodos analíticos (Hvorslev, 1951), métodos numéricos (Randolph & Brooker, 1982; Tavenas *et al.*, 1983) e o método da analogia elétrica para os ensaios de condutividade hidráulica em furos de sondagem e piezômetros, concluindo que a equação 3 (elipsóide) fornece bons resultados quanto à relação $1 < L/D < 10$ e resultados não satisfatórios para $L/D < 1$.

Substituindo o fator de Forma (equação 3) nas equações 1 e 2, resultam as equações 4 e 5 para determinação da condutividade hidráulica em ensaios com piezômetros com carga constante e variável respectivamente.

$$k = \frac{q \cdot \ln \left[\frac{m \cdot L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{m \cdot L}{D} \right)^2} \right]}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Hc} \quad (4)$$

$$k = \frac{d^2 \cdot \ln \left[\frac{m \cdot L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{m \cdot L}{D} \right)^2} \right]}{8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (5)$$

As equações originalmente desenvolvidas por Hvorslev (1951) para a interpretação de ensaios com piezômetros correspondiam à condição de solo abaixo do nível d'água. A utilização dessas equações para o solo não saturado é uma aproximação sugerida por Daniel (1989), considerando "H" como a diferença de altura entre o nível d'água dentro do piezômetro e a metade da altura do filtro. Além

disso, a influência da sucção do solo no gradiente hidráulico não é considerada. Para tal, quando da montagem do ensaio e expansão da bentonita, inicia-se a introdução de água dentro do piezômetro para a saturação. A realização desse procedimento torna o ensaio mais rápido, ou seja, a saturação ocorre em tempos mais reduzidos.

2.3 Área de Estudo

A cidade de Santa Maria está situada no centro geográfico do Estado do Rio Grande do Sul, com área de aproximadamente 1.780 km², e situa-se a 290 km da capital do estado, Porto Alegre. Segundo Maciel Filho (1990), o relevo da região de Santa Maria apresenta três feições bem distintas: a primeira é de planícies aluviais, modeladas em sedimentos quaternários, com uma topografia plana e sujeita a inundações; a segunda corresponde à área de colinas alongadas, com uma topografia suavemente ondulada, modeladas em rochas sedimentares triássicas e a terceira, composta por terrenos com declives superiores a 15%, formando patamares, que correspondem às Formações Caturrita, Botucatu e Serra Geral.

Maciel Filho, em 1990, elaborou a Carta Geotécnica de Santa Maria, utilizando como base a classificação estratigráfica de Bortoluzzi (1974) e considerando o comportamento geomecânico e hidrogeológico das rochas e depósitos superficiais. O autor dividiu a área urbana de Santa Maria nas seguintes unidades geotécnicas: Riólito Serra Geral, Basaltos e Diabásio Serra Geral, Arenito Botucatu, Formação Caturrita, Formação Santa Maria - exceto arenito basal, Arenito Basal Santa Maria e Formação Rosário do Sul. As Formações superficiais como os solos transportados que recobrem as unidades mais antigas foram denominados de Depósitos Coluvionares, Depósitos Fluviais de Várzea e Depósitos Fluviais de Terraço. A Tabela 1 resume a composição dos materiais das Unidades Geotécnicas sedimentares estudadas, no total foram vinte e dois pontos ensaiados, representados, em sua maioria, na Figura 2. Alguns locais, onde foram executados os ensaios (perfis típicos), estão localizados fora da área abrangida pela Carta Geotécnica de Santa Maria, porém optou-se por incluí-los nos resultados analisados, pois apresentam características que possibilitaram identificar as Unidades Geotécnicas a que pertencem e estão em continuidade com área estudada.

Além dos ensaios de condutividade hidráulica foram realizados, em laboratório, os seguintes ensaios de caracterização: massa específica real dos grãos, limite de plasticidade, limite de liquidez e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação. As amostras para a realização dos ensaios de laboratório foram coletadas na mesma profundidade em que foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica.

Unidades Geotécnicas	Litologia	Símbolo	Coordenadas	
			LESTE	SUL
Depósitos Fluviais	Conglomerado, arenito, com silte e argila. Depósitos de colúvio de encosta da serra.	DFL1 DFL2 DFL3	225023	6711912
		DFL4	222041	6712048
		DFL5	221852	6712122
Depósito Coluvionar	Areia grossa, média e fina. Cascalho na zona de encosta	DCO1	230540	6711954
		DCO2	228650	6712839
Formação Botucatu	Arenito médio a fino eólico	BOT1	229021	6713250
		BOT2	231433	6715515
Formação Caturrita	Arenito médio a fino, com camadas de siltito argiloso, em direção ao topo	CAT1	230563	6712045
		CAT2	229939	6710990
Formação Santa Maria Exceto Arenito Basal	Siltitos argilosos e arenitos argilosos. No topo, ocorrem argilas siltosa ou lamito vermelho.	SMA1 SMA2 SMA3	222278	6715621
		SMA4	229801	6711060
		SMA5	236855	6702853
		SMA6		
Formação Santa Maria Arenito Basal	Arenito grosseiro, feldspático, poroso. Por vezes, conglomerático, com grânulos de quartzo e argila.	SMP1	238595	6709564
		SMP2	229875	6706411
		SMP3	789137	6703213
Formação Rosário do Sul	Arenito fino, com intercalações de pelito e siltito.	ROS1 ROS2	233047	6702853

Tabela 1 Unidades Geotécnicas, litologias e identificação dos pontos analisados.

3 Resultados e Discussões

3.1 Ensaios de Caracterização

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de laboratório e a classificação dos materiais pelo sistema unificado de classificação de solos (SUCS) da ASTM (2011). Os perfis caracterizados como Depósito Fluvial da Várzea do Arroio Cadena e Ferreira apresentam texturas que variam de areias a argilas. Os resultados obtidos nos cinco perfis demonstram essas características. Os perfis DFL1 e DFL3 são areias siltosas e os perfis DFL4 e DFL5 são siltes areno-argilosos, ambos com baixa plasticidade, com fração areia superior a 50% e fração argila inferior a 16%. O perfil DFL2 apresenta uma textura argilosa, com alta plasticidade, tendo uma fração argila superior a 60%.

Os Depósitos Coluvionares foram estudados em dois perfis típicos. Ambos são constituídos por uma matriz classificada geotecnicamente como silte (ML) e apresentam uma quantidade expressiva de fragmentos de arenito e basalto em tamanhos variados, baixa a média plasticidade e contendo uma quantidade significativa de matéria orgânica, como o perfil DCO1.

Nos perfis da Formação Botucatu, nota-se a presença significativa da fração areia fina (50% a 85%), sendo que o perfil BOT2 apresenta-se mais silicificado e não plástico, sendo classificado como uma areia mal graduada (SP-SW). O perfil BOT1 possui maior quantidade de finos e baixa plasticidade, sendo classificado como silte de baixa compressibilidade (ML).

Os perfis da Formação Caturrita apresentaram uma diferenciação quanto à granulometria e plasticidade. O perfil CAT1 é de constituição mais fina, plástico e classificado geotecnicamente como um silte de baixa compressibilidade (ML). Já o perfil CAT2 é mais grosseiro, com predomínio de areia fina, não plástico, classificado com areia bem graduada com silte (SW-SM). Ambos apresentam uma de fração argila inferior a 10%.

A Formação Santa Maria - exceto Arenito Basal - apresenta uma predominância da fração fina (46% a 92%), com média a alta plasticidade ($w_L > 45\%$), sendo classificada geotecnicamente como argilas de baixa (CL) e alta plasticidade (CH).

Localização dos pontos amostrados: Carta Geotécnica de Santa Maria

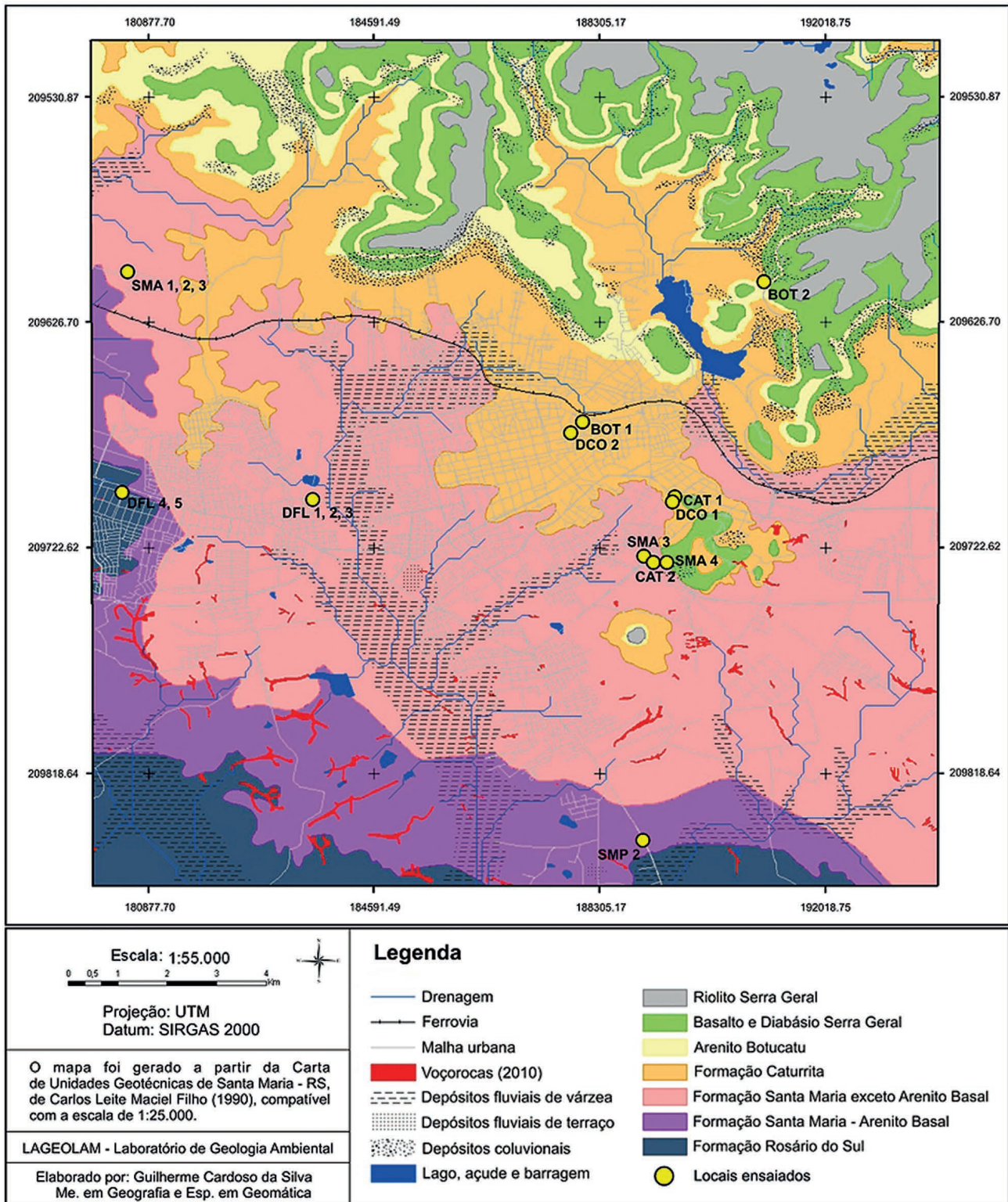


Figura 2 Localização dos perfis ensaiados na Carta Geotécnica de Santa Maria.

Unidades	γ^s (KN/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação (ASTM, 2011)
DFL1	26,1	18	14	4	5	23	28	31	13	SC-SM
DFL2	25,9	72	28	44	1	2	12	23	62	CH
DFL3	25,7	23	18	5	2	11	67	8	12	SC-SM
DFL4*	26,6	21	10	11	3	10	30	39	16	ML
DFL5*	26,6	20	10	10	3	8	37	34	16	ML
DCO1	26,4	48	35	13	21	16	21	26	16	ML
DCO2	28,0	29	25	4	12	20	15	44	9	ML
BOT1	25,6	32	24	8	0	3	50	39	8	ML
BOT2	27,2	22	N.P.	N.P.	0	1	85	5	9	SP-SM
CAT1	26,5	48	33	15	0	0	14	78	8	ML
CAT2	26,4	28	N.P.	N.P.	0	4	66	28	2	SW-SM
SMA1	27,3	48	26	22	8	15	31	30	16	CL
SMA2	27,4	86	28	58	3	3	16	46	32	CH
SMA3	26,9	53	30	23	0	1	15	15	39	ML
SMA4	26,7	45	19	24	0	2	23	53	22	CL
SMA5	27,1	51	25	36	2	2	9	45	44	CH
SMA6	27,5	73	34	39	0	1	7	42	50	CH
SMP1*	30,4	N.P.	N.P.	N.P.	48	24	11	9	6	SP-SM
SMP2	27,5	32	24	8	3	50	20	20	7	ML
SMP3	26,6	34	19	15	0	13	54	16	17	SC
ROS1	27,3	N.P.	N.P.	N.P.	18	46	10	20	6	SP-SM
ROS2	27,6	N.P.	N.P.	N.P.	14	38	9	35	4	SP-SM
ROS3	27,2	N.P.	N.P.	N.P.	10	45	19	20	8	SP-SM
ROS4	26,9	N.P.	N.P.	N.P.	8	43	19	24	6	SP-SM

Tabela 2 Resultados dos ensaios de massa específica real dos grãos, limites de consistência, granulometria e classificação pelo sistema unificado (ASTM, D24487-11) das unidades geotécnicas de Santa Maria. Legenda: γ^s = peso específico real dos grãos; w_L – Limite de Liquidez; w_p – Limite de Plasticidade; I_p – Índice de Plasticidade; N.P. – Não plástico; * solos com 2% de pedregulho.

Na Unidade Geotécnica Arenito Basal da Formação Santa Maria (parte inferior da sequência), verificou-se o predomínio da fração areia (67 a 87%), com comportamento não plástico ou de baixa plasticidade, classificadas geotecnicamente como areias mal graduadas com silte ou argila e siltes arenosos.

Na sequência sedimentar mais antiga, Formação Rosário do Sul, quatro ensaios foram

realizados, sendo a fração argila inferior a 8%, caracterizando um comportamento não plástico, classificada como areias mal graduadas com silte.

Os valores das frações granulométricas e a sua distribuição (Tabela 2) refletem uma grande variabilidade nas quantidades relativas às frações areia, silte e argila, o que deve ser atribuído ao paleoambiente gerador das Formações geológicas sedimentares na região de Santa Maria. Como

exemplos de paleoambientes das Formações geológicas têm-se: Formação Santa Maria, membro Passos das Tropas de origem fluvial; siltitos do membro Alemoa formados num sistema lacustre efêmero e os arenitos eólicos da Formação Botucatu.

3.2 Ensaios de Condutividade Hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica (k) foram realizados com carga hidráulica constante nos materiais mais permeáveis e carga hidráulica variável nos menos permeáveis, em diferentes profundidades, em função do acesso aos perfis típicos. Nos ensaios mais profundos, realizados em furos de sondagem tipo SPT (ROS 1, 2, 3 e 4), a altura do pré-filtro granular foi de 1,0m. Já nos outros ensaios realizados em profundidades menores, a altura do filtro variou de 0,15 e 0,30m.

As considerações e as fórmulas adotadas para o cálculo da condutividade hidráulica foram apresentadas nas equações 4 e 5. Os resultados dos ensaios e as respectivas profundidades são apresentados na Tabela 3. A Figura 3 apresenta graficamente a amplitude de todos os valores obtidos de condutividade hidráulica na região de Santa Maria, classificados de acordo com os valores propostos por Terzaghi & Peck (1967).

Os Depósitos Fluviais do Arroio Cadena e Ferreira são caracterizados pela sua textura arenosa e argilosa em porções variáveis, essa diferenciação granulométrica verificou-se nos ensaios de condutividade hidráulica. O perfil argiloso (DFL2) apresentou um comportamento menos permeável que os perfis arenosos (DFL1, DFL2, DFL4 e DFL5).

Os perfis localizados em depósitos coluvionares apresentaram valores médios de coeficiente de condutividade hidráulica (na ordem de 10^{-5} m/s), sendo considerados os mais elevados (permeáveis) dentre as unidades estudadas, pois são materiais porosos, mesmo que predomine a fração argila neles. Os valores obtidos assemelham-se aos encontrados na bibliografia, como, por exemplo, nos estudos realizados por Perazzolo (2003) em colúvios argilosos nas cidades de Bento Gonçalves/RS e Caxias do Sul/RS, em depósitos coluvionares na região de Santa Cruz do Sul/RS (Pinheiro *et al.*, 2012).

A Formação Botucatu apresentou valores médios de coeficiente de condutividade hidráulica

na ordem de $2,8 \times 10^{-6}$ m/s, semelhantes aos encontrados por Bortoli (1999) em um solo de alteração dessa mesma Formação no município de São Sebastião do Caí/RS ($k = 1,8 \times 10^{-6}$ m/s). Já Pinheiro (2000) ao estudar os arenitos *intertraps* da Formação Botucatu na cidade de Santa Cruz do Sul/RS obteve valores de permeabilidade um pouco menores ($k = 6,0 \times 10^{-7}$ m/s).

Os resultados obtidos para os perfis da Formação Caturrita foram similares ao encontrados para a Formação Botucatu. A condutividade hidráulica obtida foi na ordem de 10^{-6} m/s.

Os valores mais baixos de condutividade hidráulica obtidos foram para a parte superior da Formação Santa Maria, Unidade Geotécnica denominada de Formação Santa Maria - Exceto Arenito Basal que foram da ordem de $6,0 \times 10^{-8}$ a $7,2 \times 10^{-9}$ m/s. Nessa Formação, predominam materiais mais finos (siltes e argilas) em relação à fração areia, o que se reflete nos valores de baixa condutividade hidráulica obtida nos ensaios (Figura 3). Pinheiro *et al.* (2012) encontraram valores de condutividade entre $5,2 \times 10^{-8}$ x a $4,1 \times 10^{-9}$ m/s para essa Formação em estudos de estabilidade de encostas na cidade de Santa Cruz do Sul/RS.

Unidade Geotécnica	Ensaio	Prof. (m)	L/D	k (m/s)	Valor médio (m/s)
Depósitos Fluviais	DFL1	1,10	3,5	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$
	DFL2	1,00	3,5	$3,3 \times 10^{-7}$	
	DFL3	1,00	3,5	$2,9 \times 10^{-5}$	
	DFL4	1,80	3,5	$5,7 \times 10^{-6}$	
	DFL5	1,50	3,5	$4,5 \times 10^{-6}$	
Depósito Coluvionares	DCO1	0,50	5	$6,9 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$
	DCO2	4,0	5	$1,9 \times 10^{-5}$	
Botucatu	BOT1	0,65	2	$5,3 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
	BOT2	0,50	2	$4,4 \times 10^{-7}$	
Caturrita	CAT1	0,45	2	$1,9 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
	CAT2	1,0	3,5	$1,0 \times 10^{-6}$	
Santa Maria Exceto Arenito Basal	SMA1	1,5	3,5	$6,0 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-8}$
	SMA2	1,75	3,5	$2,3 \times 10^{-8}$	
	SMA3	1,0	3,5	$7,2 \times 10^{-9}$	
	SMA4	1,0	3,5	$1,0 \times 10^{-8}$	
	SMA5	1,3	3,5	$8,8 \times 10^{-9}$	
	SMA6	0,4	3,5	$3,1 \times 10^{-8}$	

Santa Maria Arenito Basal	SMP1	0,5	3,5	$7,0 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
	SMP2	0,85	2,5	$6,5 \times 10^{-7}$	
	SMP3	1,0	3,5	$1,2 \times 10^{-6}$	
Rosário do Sul	ROS1	6,6	10	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$
	ROS2	6,5	10	$3,6 \times 10^{-6}$	
	ROS3	6,8	10	$2,7 \times 10^{-6}$	
	ROS4	6,5	10	$3,6 \times 10^{-6}$	

Tabela 3 Resultados dos ensaios com piezômetros para determinação do k (in situ).

Já para o Arenito Basal da Formação Santa Maria, onde predominam as frações areia grossa/média sobre a fina, os resultados dos ensaios apresentam uma condutividade hidráulica entre $1,2 \times 10^{-6}$ a $7,0 \times 10^{-6}$ m/s. O menor valor de condutividade dessa unidade foi obtido no perfil SMP6, localizado num material de alteração (solo saprolítico), onde predomina a areia média em relação à fração mais grossa.

Os valores obtidos para os perfis da Formação Rosário do Sul foram similares aos da Formação Santa Maria - Arenito Basal, com uma condutividade hidráulica da ordem de $2,5 \times 10^{-6}$ m/s, exceto para o perfil ROS1 que apresentou um valor inferior de condutividade hidráulica.

4. Conclusões

Os ensaios de condutividade hidráulica em piezômetros realizados nas Unidades Geotécnicas de Santa Maria mostraram resultados satisfatórios

em relação ao tempo de ensaio e aos valores obtidos, confirmando e quantificando as informações contidas no trabalho de Maciel Filho (1990). Essa técnica mostrou-se eficiente, pois considera a utilização de um filtro granular (L/D) equivalente a um elipsóide e adota solução analítica da equação de Laplace para o fator de forma (F), podendo ser realizado desde profundidades pequenas até profundidades mais elevadas em furos de sondagem.

Os Depósitos Coluvionares (COL) e os Fluviais (DFL) foram as unidades que apresentaram valores de condutividade média, variando de 1 a $4,4 \times 10^{-5}$ m/s, sendo considerados os materiais mais permeáveis da região de Santa Maria. Vale ressaltar que a presença de materiais mais argilosos nessa unidade pode resultar em valores mais baixos de permeabilidade.

As Unidades Geotécnicas das Formações Botucatu, Caturrita, Santa Maria - Arenito Basal e Rosário do Sul apresentaram valores médios de condutividade hidráulica ($1,5 \times 10^{-6}$ a $2,9 \times 10^{-6}$ m/s). Já a Unidade Formação Santa Maria Exceto Arenito Basal apresentou baixa condutividade hidráulica, com valores em torno de $2,2 \times 10^{-8}$ m/s por ser composta por materiais siltsos e argilosos.

As Unidades Geotécnicas mostraram diferentes valores de condutividade hidráulica, o que se dá principalmente pela composição granulométrica, cimentação e estruturas sedimentares presentes. Isto significa, em termos ambientais e hidrogeológicos, que a infiltração de águas nos aquíferos apresenta diferentes condições de recarga, o que deve ser considerado na avaliação e na gestão das reservas de águas subterrâneas da região.

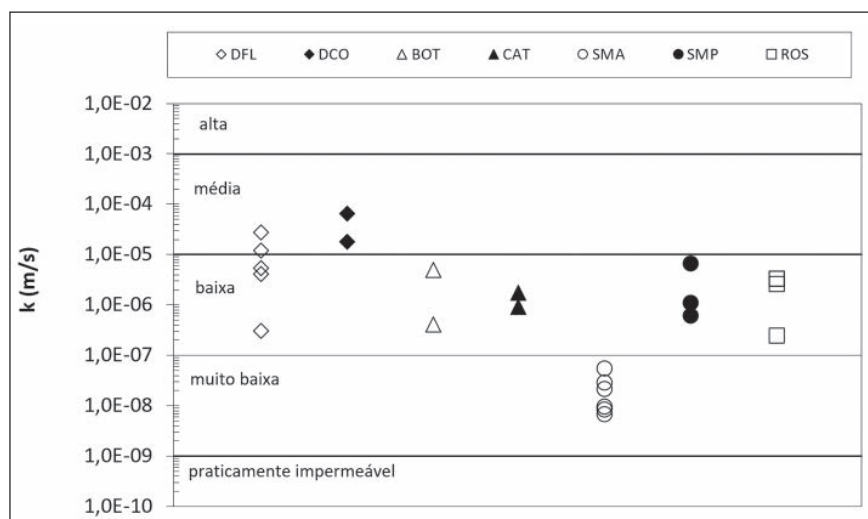


Figura 3 Representação gráfica dos resultados dos ensaios de condutividade hidráulica de acordo com a escala proposta por Terzaghi & Peck (1967).

5 Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, ABGE 2013. *Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo*. São Paulo: ABGE, vários autores. 75p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D2487- 2011. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bortoli, C.R. 1999. *Estudo numérico experimental da condutividade hidráulica saturada/não saturada de um solo estruturado*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 121p.
- Bortoluzzi, C.A. 1974. Contribuição à Geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do sul, Brasil. *Pesquisas*, 4(1): 7-86.
- Brand, E.W. & Premchitt, J. 1980. Shape factors of cylindrical piezometers. *Geotechnique*, 30(4): 369-384.
- Chapuis, R. P. 1989. Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Ground Water*, 37(5): 647-654.
- Daniel, D.E. 1989. Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 21(2): 285-300.
- Daniel, D.E. 1994. State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: DANIEL, D.E. & STEPHEN, J. (ed.). *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*. Ed. ASTM, p. 30-78.
- Hvorslev, M.J. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations, *Bulletin no. 36, Waterways Experiment Station*, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS. 50p.
- Maciel Filho, C.L. 1990. *Carta geotécnica de Santa Maria*. Imprensa Universitária/FINEP. UFSM, Santa Maria, 21p.
- Mesquita, M.G.B. & Moraes, S.O. 2004. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, 34(3): 963-969.
- Nagy, L.; Tabacks, A.; Huszák, T. & Varga, G. 2013. Comparison of permeability testing methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 18, Paris. Technical Committee 101 – Session II, 2013, p. 399-402.
- Olson, R.E. & Daniel, D.E. 1981. Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. ZIMMIE, T.F & RIGGS, C.O. (Eds). *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*. Ed. ASTM, p. 18-64.
- Pinheiro, R.J.B. 2000. *Estudos e alguns casos de instabilidade de encostas da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 340p.
- Pinheiro, R.J.B; Nummer, A.V. & Bressani, L.A. 2012. Análise de instabilidade de uma encosta localizada na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS. *Geociências*, 31(2): 159-174.
- Perazolo, L. 2003. *Estudo geotécnico de dois taludes da Formação Serra Geral, RS*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 150p.
- Randolph, M.F. & Booker, J.R. 1986. Analysis of seepage into a cylindrical permeameter. In: INT. CONF. ON NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, 4, Edmonton, 1986, 1(4): 349-357.
- Reichardt, K. 1996. *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. 2ed. Piracicaba: ESALQ. Depto de Física e Meteorologia, 160p.
- Tavenas, F.; Jean, A.P.; Leblond, P. & Leroueil, S. 1983. The permeability of natural soft clays. Part 2: Permeability characteristics. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 645-660.
- Tavenas, F.; Diene, M. & Leroueil, S. 1990. Analysis of the in situ constant head permeability test in clays. *Geotechnical Testing Journal*, 27: 305-314.
- Terzaghi, K. & Peck, R.B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd. ed. John Wiley and Sons, New York.
- Wilkinson, W.B. 1968. Constant head in situ permeability tests in clay strata. *Geotechnique*, 18: 172-194.