

# Determinação da condutividade hidráulica com tecnologias *Direct Push*: vantagens e desvantagens

DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY WITH DIRECT PUSH TECHNOLOGIES: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

MALENA D'ELIA OTERO<sup>1,2,3</sup>, ANA ELISA SILVA DE ABREU<sup>1,4</sup>

1-Aluna de Pós-Graduação (Especialização), Inst. Pesq. Tecnol. Est. São Paulo (IPT)

2- Professora do Instituto de Geociências da UNICAMP

3- E-mail: malena.delia.otero@gmail.com

4- E-mail: anaelisa@ige.unicamp.br

**ABSTRACT:** Estimating hydraulic conductivity ( $K$ ) and its spatial variability are essentials for the characterization of contaminated areas. This paper presents a literature review of direct push techniques that are gaining ground in the Brazilian scenario for hydraulic conductivity profiling. Slug tests in wells, direct push slug test (DPST), piezocone (uCPT), direct push injection logger (DPIL) and hydraulic profiling tool (HPT) are analysed. Direct push tools work with higher resolution and are faster; nevertheless, they can be used only in unconsolidated materials because they cannot be pushed into stiff materials. This limitation does not apply to slug tests in wells, which have less resolution because of the longer screen section. DPST provides direct values of  $K$  while DPIL and HPT provide relative values that must be correlated with absolute values from slug tests. The most frequently used correlations were developed in temperate and cold climate regions, where soils are substantially different from tropical soils and its applicability to Brazilian soils must still be validated. This is a research line to be encouraged in tropical region. In the Brazilian context, slug tests are still advantageous and evolving to shorter screen sections is an alternative to improve its resolution.

**Manuscrito:**

Recebido: 20/04/2017

Corrigido: 02/06/2017

Aceito: 07/08/2017

**Citation:** Otero M.E., Abreu A.E.S. 2016. Determinação da condutividade hidráulica com tecnologias *Direct Push*: vantagens e desvantagens *Terraë*, **13**(1-2):31-38.

**Keywords:** Hydraulic Conductivity, CPTu, DPIL, HPT, slug test, tropical soils.

## Introdução

A caracterização hidrogeológica de uma área contaminada deve levar ao completo entendimento do fluxo hidrogeológico e do transporte dos contaminantes no local. O sucesso da remediação desta área depende da adequada compreensão das características do meio físico e regimes de fluxo subterrâneo. A determinação da condutividade hidráulica ( $K$ ) do solo e da sua variabilidade no espaço é de suma importância, pois esta propriedade controla tanto o fluxo de água subterrânea como o transporte de massa do contaminante, bem como a magnitude de dispersão do mesmo (Paradis et al. 2014).

A condutividade hidráulica pode ser definida como a facilidade com que água se movimenta em um meio. Esta facilidade de movimento é diretamente proporcional à quantidade e à dimensão ou abertura dos poros e fraturas interconectados no meio atravessado. Pode ser obtida em ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, sendo estes últimos mais utilizados em projetos de remediação de contaminações que atingem a zona saturada.

Dentre os ensaios *in situ*, o mais comum e consolidado para diagnóstico de áreas contaminadas no

Brasil é o *slug test* (Ferraz et al. 2015). Este ensaio permite a determinação direta de  $K$  e os resultados obtidos são confiáveis. Entretanto, tratam-se de valores médios para o intervalo onde está instalada a seção filtrante no poço de monitoramento, que, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), deve ser preferencialmente do tipo curto, com até 2 metros de comprimento.

Estudos recentes na área ambiental têm mostrado que as pequenas heterogeneidades do meio geológico podem ser cruciais para o controle da distribuição de contaminantes (Köber et al. 2009, Lessoff et al. 2010, Paradis et al. 2014, McCall et al. 2014).

Os *slug tests*, da forma como têm sido executados no Brasil, não permitem identificar heterogeneidades no meio. Por este motivo, há uma demanda crescente de novas tecnologias que permitam determinar a condutividade hidráulica de forma rápida e detalhada, possibilitando que se identifique a variabilidade espacial de  $K$ . Para tal fim destacam-se as tecnologias tipo *direct push*, as quais consistem na penetração contínua no terreno por cravação estática ou percussão de hastes ocas em cujas pontas podem ser acoplados diversos sen-

sores que permitem medir propriedades do meio e coletar amostras de solo, gás e água (Dietrich & Leven 2006). As ferramentas acopladas ao sistema *direct push* mais utilizadas para a determinação de  $K$  atualmente são o Piezocone (CPTu), o *Direct Push Injection Logger* (DPIL) e o *Hydraulic Profiling Tool* (HPT).

A apresentação destas tecnologias é o objeto deste artigo, que está baseado em uma revisão bibliográfica sobre o assunto. Destacam-se as vantagens e desvantagens destas técnicas e as limitações de sua aplicação direta a casos brasileiros.

## Métodos para determinação de $K$ em campo

### Slug Test

Para a execução de ensaios de *slug test* são necessários a instalação e o desenvolvimento de poços de monitoramento. O ensaio em si consiste na variação instantânea do nível d'água dentro do poço provocada pela inserção e retirada de um cilindro rígido, chamado *slug* ou tarugo. Quando ocorre inserção do cilindro, instantaneamente o nível d'água do poço se eleva e mede-se o tempo necessário para o rebaixamento. De maneira contrária, quando o cilindro é retirado, ocorre o rebaixamento do nível d'água e então mede-se o tempo necessário para a recuperação (Azevedo & Albuquerque Filho 2013).

A condutividade hidráulica é calculada por soluções analíticas, sendo os métodos de Hvorslev (1951 apud Fetter 2001) e de Bouwer & Rice (1976 apud Fetter 2001) os mais utilizados.

O ensaio de *slug test* pode ser executado também com técnica *direct push* dispensando a necessidade de instalação prévia de um poço. Trata-se de uma metodologia pouco utilizada no Brasil, devido principalmente aos custos envolvidos, sendo prática comum em outros países.

De acordo com McCall et al. (2002), o *direct push slug test* (DPST) consiste na cravação de um tubo duplo até a profundidade do ensaio. Atingida esta profundidade, o tubo interno é sacado e é inserida uma haste de perfilagem que contém uma seção filtrante, cujo comprimento é definido pelo usuário (normalmente varia entre 15 e 30cm). Com a haste posicionada na profundidade do ensaio, o tubo externo é subido de forma a deixar a seção filtrante exposta, permitindo a realização do ensaio, que segue o procedimento descrito anteriormen-

te para os ensaios em poços de monitoramento. Quando o ensaio é finalizado, o tubo externo é posicionado novamente na profundidade do ensaio, a haste de perfilagem é sacada, e o tubo interno é inserido, permitindo que a perfuração prossiga até a próxima profundidade a ser ensaiada.

Uma das vantagens do DPST é que permite verificar variações da condutividade hidráulica em uma mesma perfuração, aproximando-se dos métodos de perfilagem apresentados a seguir. Em contrapartida, Sellwood et al. (2005) destacam como principais limitações do método o tempo dispendido para sacar e reinserir hastes, a necessidade de circulação de água para manter o sistema limpo, impedindo a entrada de sedimentos e consequente entupimento do equipamento, a possibilidade de modificar a química da água presente no meio por meio do uso de água de circulação e a necessidade de conhecimento prévio da estratigrafia do meio para definição dos trechos a serem ensaiados.

### Piezocone (CPTu)

O ensaio de penetração de piezocone é comumente utilizado na área de engenharia geotécnica para determinação da estratigrafia e de propriedades geotécnicas dos solos. Consiste na cravação no terreno de uma ponteira cônica de 10 a 15 cm<sup>2</sup> de área de seção transversal a uma velocidade constante (normalmente de 20mm/s) enquanto são medidos a resistência de ponta ( $q_c$ ), o atrito lateral ( $f_s$ ) e as pressões neutras (ou pressões na água) geradas durante a cravação ( $u$ ) (Schnaid & Odebrecht 2012).

A Figura 1 apresenta uma destas ponteiros. Neste caso, a leitura das pressões neutras é feita na posição que se convencionou chamar de  $u_2$ , logo acima da ponta (De Mio 2005).



Figura 1. Exemplo de ponteira utilizada no ensaio CPTu (a) e detalhe da posição de leitura das pressões neutras logo acima da ponta (b)

O valor de  $q_c$  lido no campo deve ser corrigido devido ao efeito de áreas desiguais, em função da posição das leituras de pressão neutra, obtendo-se a resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ). Lunne et al. (1997) apresentam os procedimentos para esta correção.

A partir dos resultados de  $q_t$  e  $f_s$  utilizam-se ábacos ou classificações consagradas para estimar parâmetros de estado inicial, de deformabilidade e de resistência ao cisalhamento dos solos atravessados. A pressão neutra medida fornece um perfil contínuo de drenabilidade do material, que é utilizado na prática de engenharia para interpretação do comportamento geotécnico esperado para as camadas. As grandezas  $q_t$  e  $f_s$  e as pressões neutras medidas permitem calcular as razões adimensionais de resistência de ponta corrigida ( $Q_r$ ), de razão de atrito normalizada ( $F_r$ ) e de pressões neutras ( $B_q$ ).

A penetração do piezocone também pode ser paralisada para a realização de um ensaio de dissipação de pressões neutras. Com a paralisação da cravação, as pressões neutras geradas pela própria cravação da ponteira se dissipam naturalmente. Durante este ensaio registram-se as variações da pressão neutra ao longo do tempo e obtêm-se curvas de dissipação.

A permeabilidade do solo pode ser estimada em ensaios de CPTu de diversas formas: através de correlações entre o tipo de comportamento do solo definido no ensaio (Robertson et al. 1986 apud Lunne et al. 1997 e Robertson 1990 apud Lunne et al. 1997), através de cálculos com parâmetros obtidos em ensaios de dissipação (Lunne et al. 1997, De Mio 2005, Robertson 2010) e por meio de relações empíricas a partir dos parâmetros obtidos no ensaio (Elsworth & Lee 2005, Chai et al. 2011).

A estimativa por intermédio de ensaios de dissipação aplica-se apenas a camadas de baixa condutividade hidráulica, onde há geração de pressões neutras durante a cravação do piezocone. Camadas que apresentam baixa permeabilidade normalmente não contribuem significativamente para o transporte do contaminante por advecção, atuando como barreiras que inibem o fluxo. Por este motivo essa metodologia não será detalhada neste artigo.

Permeabilidade estimada com base no tipo de comportamento do solo

Robertson et al. (1986 apud Lunne et al. 1997) e Robertson (1990 apud Lunne et al. 1997) sugerem faixas de permeabilidade em função do tipo de comportamento esperado para o solo conforme apresentado na Tabela 1. O tipo de comportamento

Tabela 1. Intervalos de condutividade hidráulica para cada tipo de comportamento de solo. Fonte: Lunne et al. (1997)

Tipo de comportamento de solo	Intervalo de $k$ (m/s)
Solos finos sensitivos	$3 \times 10^{-10}$ a $3 \times 10^{-8}$
Solos orgânicos – argila	$1 \times 10^{-10}$ a $1 \times 10^{-8}$
Argila	$1 \times 10^{-10}$ a $1 \times 10^{-9}$
Mistura de silte	$3 \times 10^{-9}$ a $1 \times 10^{-7}$
Mistura de areia	$1 \times 10^{-7}$ a $1 \times 10^{-5}$
Areia	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-3}$
Areia cascalhosa	$1 \times 10^{-3}$ a 1
Solo muito denso/rígido	$1 \times 10^{-8}$ a $1 \times 10^{-3}$
Solo fino muito rígido	$1 \times 10^{-9}$ a $1 \times 10^{-7}$

esperado para o solo é obtido em ábacos a partir de  $Q_r$ ,  $F_r$  e  $B_q$  calculados para cada camada atravessada no perfil de solo.

A proposta está baseada na experiência geotécnica de comparação de resultados de ensaios de granulometria e ensaios de permeabilidade em laboratório e extrapolação desta experiência para ensaios de campo, grupo ao qual pertence o ensaio de piezocone. De acordo com Robertson (2010), a permeabilidade estimada a partir do tipo de comportamento do solo é aproximada, mas geralmente correta em termos de ordem de grandeza.

Permeabilidade estimada a partir de relações empíricas entre os parâmetros obtidos no ensaio

Elsworth & Lee (2005) e Chai et al. (2011) propuseram relações empíricas associando a permeabilidade  $K$ , determinada por slug tests, a uma permeabilidade adimensional chamada  $K_d$  calculada a partir dos parâmetros adimensionais de  $Q_r$ ,  $F_r$  e  $B_q$ .

Ambas relações se aplicam a terrenos semelhantes àqueles para as quais foram desenvolvidas. No caso de Elsworth & Lee (2005), o método é aplicável em camadas de permeabilidade intermediária (entre  $10^{-4}$  e  $10^{-7}$  m/s) e foi testado em duas áreas de estudo localizadas em São Francisco e Geórgia (EUA). A relação proposta por Chai et al. (2011) aplica-se a depósitos de argila pouco a normalmente sobreadensados e depósitos de areia solta e foi testada em duas cidades do Japão.

### Direct Push Injection Logger (DPIL)

O DPIL é uma ferramenta utilizada para definir perfis verticais de condutividade hidráulica por meio de ensaios discretos, não contínuos, e foi apresentado por Dietrich, Butler e Faiß (2008). Ele consiste em uma sonda com uma janela de injeção



Figura 2. . Sonda DPIL. Janela de injeção indicada. Modificado de Vianna et al. (2016)

posicionada na ponta inferior de um tubo que é cravado no solo com tecnologia *direct push* (Figura 2). O sistema é complementado por um tubo de injeção, um controlador de fluxo, um transdutor de pressão, um sistema de aquisição e um reservatório de água. Enquanto ocorre o avanço do tubo, é injetada água em seu interior de forma a manter a janela limpa. A ferramenta é então paralisada no ponto onde se quer obter  $K$  e é medida a pressão de água necessária para injetar água numa determinada taxa.

O método permite obter um  $K$  relativo, denominado  $K_r$  ou  $K_{DPIL}$ , a partir da relação entre a taxa de injeção e a pressão. O ensaio demora entre dois e três minutos por ponto a ser estudado. De acordo com Dietze e Dietrich (2012) as taxas de injeção de água podem variar entre 200 a 300 l/h em solos granulares grosseiros e entre 1 e 2 l/h em solos mais densos.

Segundo Dietrich, Butler e Faiß (2008),  $K_r$  (l/(h bar)) é calculado a partir da pressão e da taxa de injeção de água e de parâmetros de correção em função de resistência do sistema devido ao tipo de fluxo (laminar ou turbulento). Para maiores detalhes da formulação envolvida, recomenda-se consultar o trabalho de Dietrich, Butler e Faiß (2008)

Trata-se, portanto, de um método que não fornece  $K$  diretamente. O  $K_{DPIL}$  por si só caracteriza o aquífero apenas de forma qualitativa, determinando zonas que podem atuar como condutoras da pluma de contaminação ou como barreiras. Para obter valores de  $K$  é necessário fazer uma calibração com valores calculados por meio do uso de outras tecnologias. Lessoff et al. (2010) e Dietze e Dietrich (2012) apresentaram correlações com valores de  $K$  determinados a partir de ensaios de *direct push slug test*. Lessoff et al. (2010) trabalharam em aquífero sedimentar de origem glacial, onde predominam areias médias a grossas e cascalho, no sudoeste da Alemanha. Dietze e Dietrich (2012) estudaram um aquífero sedimentar de origem fluvial, no qual intercalam-se camadas de areia fina e de cascalho médio a grosso, localizado também na Alemanha.

## Hydraulic Profiling Tool (HPT)

O HPT assemelha-se ao DPIL, no entanto, a água é injetada com taxa constante e consideravelmente menor (até 30l/h). A ferramenta leva aproximadamente uma hora e meia para perfilar continuamente uma profundidade de 20m e, nestas condições, consome aproximadamente 20l de água (Geoprobe Systems 2013). A Figura 3 apresenta um esquema da ponteira. O sistema consiste em um conjunto da sonda, *trunkline*, controle de fluxo HPT e sistema de armazenamento de dados.

Por meio da injeção de água e da pressão necessária para manter a injeção numa taxa constante (chamada “pressão HPT”) é possível obter informações sobre a condutividade hidráulica do material atravessado.

A condutividade hidráulica é estimada através de uma relação empírica, a qual considera a taxa de fluxo  $Q$  e a pressão HPT corrigida  $P_c$ . Tal rela-

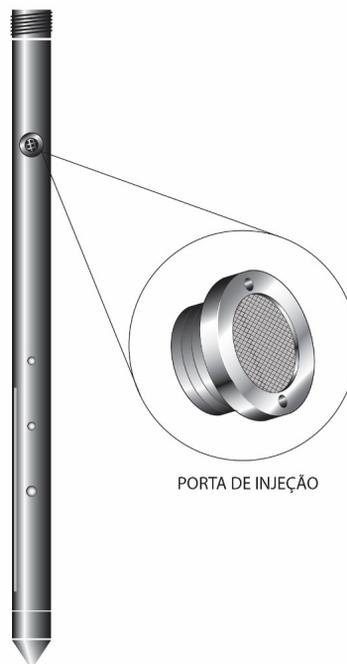


Figura 3. Esquema de sonda HPT com detalhe da porta de injeção. Modificado de Geoprobe Systems (2017)

ção foi desenvolvida por McCall e Christy (2010 apud McCall 2010) a partir de correlação empírica entre ensaios de *slug test* e de HPT executados em uma área nos Estados Unidos e aplicada a terrenos saturados com  $K$  entre  $2,6 \times 10^{-2}$  cm/s e  $3,5 \times 10^{-5}$  cm/s. Informações detalhadas sobre a formulação constam do trabalho de Mc Call et al. (2014).

A pressão HPT corrigida é calculada a partir de pressão total necessária para realizar a injeção de água  $P_{total}$ , medida no transdutor durante a injeção, da pressão atmosférica  $P_{atmosférica}$ , medida antes de iniciar o ensaio e da pressão hidrostática  $P_{hidrostática}$  obtida através de ensaios de dissipação total de pressão de água, conforme a equação (1):

$$P_c = P_{total} - P_{atmosférica} - P_{hidrostática} \quad (1)$$

De acordo com McCall (2010), deve ser realizado no mínimo um ensaio de dissipação total em todo o perfil, no entanto sugere-se um ensaio por camada permeável, uma vez que a resposta de dissipação nestas camadas é mais rápida e mais confiável. O autor sugere também o desenvolvimento de relações empíricas para cada local de estudo de forma a obter estimativas mais confiáveis.

## Comparação entre os métodos descritos

O Tabela 2 apresenta uma síntese das características de cada método abordado neste trabalho.

Os métodos que fazem uso de tecnologia *direct push* apresentam limitações em comum oriundas da própria técnica de cravação.

Nielsen (2006) destaca que a cravação e o avanço de ferramentas de *direct push* podem causar densificação e desagregação do material, resultando assim na diminuição local da condutividade hidráulica, principalmente em materiais finos. Este efeito pode ser reduzido através da geometria da ferramenta, de forma a evitar o transporte de solo.

No caso do *slug test* e do DPST, o efeito da densificação do solo é evitado com os procedimentos de desenvolvimento do furo realizados previamente ao ensaio de *slug test*. Nos casos do DPIL e do HPT tais procedimentos não são realizados e os valores de  $K$  podem ser mascarados, ainda, devido ao entupimento das portas de injeção durante a cravação. Portanto, para estas metodologias, é de suma importância que a cravação da ferramenta seja feita de forma cuidadosa, mantendo circulação de água em taxa adequada para evitar o entupimento.

Condições geológicas desfavoráveis como a ocorrência de cascalho, calhau e matações, muito comuns em horizontes de alteração de solos tropi-

cais, a presença de horizontes de solo mais rígidos ou cimentados, assim como o topo rochoso limitam a profundidade de penetração das ferramentas tipo *direct push*.

Com relação ao tempo de duração dos ensaios, de modo geral, o DPIL e o HPT levam menos tempo do que as outras técnicas. De acordo com Köber et al. (2009), enquanto um ensaio de DPST leva de uma a duas horas por ponto estudado, o DPIL demora de dois a três minutos por ponto; em um dia é possível executar um perfil DPST com cinco a sete pontos estudados ou quatro perfis DPIL com 40 a 60 pontos de estudo, e um perfil de HPT leva o mesmo tempo para ser realizado do que um perfil DPIL.

Outro aspecto a ser considerado é que, apesar de o HPT ser um ensaio de perfilagem contínua, requer ensaios de dissipação total de pressão de água em cada camada permeável para calibração da pressão hidrostática. A eficiência do método está diretamente relacionada a estes ensaios de dissipação; caso não seja possível realizar a dissipação total da pressão, o resultado do HPT perde validade.

O ensaio tradicional de *slug test* é considerado por Köber et al. (2009) como um ensaio demorado, pois estes autores incluem a necessidade de instalação e desenvolvimento do poço de monitoramento na avaliação do tempo de ensaio. No entanto, dentro do cenário brasileiro, os poços de monitoramento são instalados não apenas para realização de ensaios tipo *slug test*, como também para utilização sequencial durante todo o período de monitoramento de uma área. Portanto, para efeitos de comparação com outros métodos de determinação de  $K$  o tempo necessário para instalação do poço não é normalmente considerado um fator limitante para sua execução.

As técnicas DPIL, CPTu e HPT dependem de correlações estabelecidas empiricamente para estimativa de  $K$ , como as propostas por Robertson (1990 apud Lunne et al. 1997), Elsworth & Lee (2005), Chai et al. (2011) e McCall (2010). Estas correlações devem ser aplicadas com ressalvas no Brasil pois foram desenvolvidas em países cujas condições climáticas diferem das brasileiras e, portanto, a evolução genética dos solos é também diferente. Para efeitos do cronograma dos trabalhos de investigação de uma área contaminada, o tempo total necessário para execução de ensaios com CPTu, DPIL e HPT para determinação de  $K$  deve considerar também o tempo necessário para os ensaios de calibração.

Tabela 2. Síntese das características das técnicas de slug test, DPST, DPIL e HPT

		Aplicabilidade	Necessidade de trabalhos prévios ao ensaio	Fornece o K diretamente	Permite perfilagem contínua	Necessidade de injeção de água	Limitações no valor de K estimado	Limitações de tempo	Limitações de profundidade de execução
SLUG TEST	Convencional	Todos os tipos de solo	Instalação e desenvolvimento de poço de monitoramento	Sim	Não	Não	Não há; no entanto o valor estimado refere-se ao valor médio do intervalo com seção filtrante	Tempo para instalar e desenvolver o poço de monitoramento e aguardar a estabilização do N.A.	Não há
	DPST	Todos os tipos de solo	Não	Sim	Não	Sim	Não há	Necessário desenvolvimento do trecho ensaiado antes de realizar o ensaio	
CPTU	Correlação com tipo de solo	Todos os tipos de solo	Não	Sim, porém os valores servem apenas como um referencial	Sim	Não	Não há	Não há	Limitações de cravação pela técnica de <i>direct push</i> : cravação é possível em materiais inconsolidados.
	Relação empírica de parâmetros	Solos grossieiros em condições parcialmente não drenadas a argilas pouco a normalmente adensadas e solos arenosos	Não	Não, necessita de calibração.	Sim	Não	Valores de ordem de grandeza entre $10^{-4}$ e $10^{-7}$ m/s	Necessário desenvolver calibrações locais	Condições desfavoráveis para o avanço da ferramenta: cascalho, matacões, solos duros, solos muito cimentados.
	DPIL	Todos os tipos de solo	Não	Não, necessita de calibração.	Não	Sim	Não há	Necessário desenvolver calibrações locais	
HPT	Todos os tipos de solo, na zona saturada	Não	Não, necessita de calibração.	Sim	Sim	Sim	$2,6 \times 10^{-2}$ cm/s a $3,5 \times 10^{-5}$ cm/s	Necessário desenvolver calibrações locais	

Nas referências consultadas para elaboração deste estudo comparativo não foram encontradas informações a respeito dos volumes de solo que cada um dos ensaios atinge nem, no caso do DPIL e do HPT, dos efeitos da pressão de injeção no meio, como eventual modificação da estrutura e características do solo, aspectos considerados importantes e que devem ser abordados em pesquisas futuras.

## Conclusões

Com base na revisão bibliográfica desenvolvida conclui-se que nenhuma das técnicas de *direct push* estudadas (CPTu, DPIL e HPT) pode ser aplicada sozinha para estimativas de valores absolutos de  $K$ . É necessário desenvolver correlações locais para estimar o valor de  $K$ . As correlações apresentadas nos trabalhos consultados foram desenvolvidas em solos de regiões de clima temperado e frio, que têm mineralogia e estrutura diferentes dos solos tropicais, como os que predominam no Brasil.

Com os ensaios de *slug test* em poços de monitoramento convencionais e/ou DPST é possível determinar diretamente a condutividade hidráulica, sem a necessidade de se desenvolverem correlações.

De modo geral, as técnicas que fazem uso de *direct push* são mais rápidas que os *slug tests* em poços e permitem realizar ensaios em escala de maior detalhe, identificando as heterogeneidades do meio: enquanto o DPIL e o HPT trabalham em escala centimétrica, as seções filtrantes de poços de monitoramento no Brasil têm normalmente escala métrica. Seções filtrantes em poços de monitoramento com tal comprimento dificultam a compreensão da variabilidade espacial da condutividade hidráulica. Uma alternativa para este fato seria evoluir para poços de monitoramento com seções filtrantes ainda mais curtas, talvez decimétricas.

As ferramentas de perfilação com *direct push* que estão entrando no mercado brasileiro cumprem um papel importante na investigação de áreas contaminadas, mas devem ser entendidas como ferramentas de perfilação estratigráfica. Elas não se aplicam à determinação direta da condutividade hidráulica do terreno, havendo a necessidade de se desenvolverem correlações locais para este fim.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao eng. Marcos Tanaka Riyis, da ECD Sondagens Ambientais, e à Prof. Dra. Marilda M. G. Ramos Vianna, da Escola Politécnica da USP, pelos esclarecimentos prestados.

## Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. 2007. *NBR 15495-1: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados Parte 1: Projeto e construção*. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT. 25 p.
- Azevedo A.A., Albuquerque Filho J.L. orgs. 2013. *Ensaios de permeabilidade em solos: Orientações para sua execução no campo*. 4. ed. São Paulo: ABGE, Assoc. Bras. Geol. Engenharia e Ambiental.
- Chai J.C., Agung P.M.A., Hiro T., Igaya Y., Carter J.P. 2011. Estimating hydraulic conductivity from piezocone soundings. *Géotechnique*, **61**(8):699-708.
- De Mio G. 2005. *Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental*. São Carlos: Esc. Eng. São Carlos, USP. 348p. (Tese Dout.).
- Dietrich P., Butler J.J., Faiß K. 2008. A Rapid Method for Hydraulic Profiling in Unconsolidated Formations. *Ground Water*, **46**(2):323-328.
- Dietrich P., Leven C. 2006. Direct push-technologies. In: Kirsch, R. 2006. *Groundwater Geophysics*. Berlin, Heidelberg: Springer. p.347-366.
- Dietze M., Dietrich P. 2012. Evaluation of vertical variations in hydraulic conductivity in unconsolidated sediments. *Ground Water*, **50**(3):450-456.
- Elsworth D., Lee D.S. 2005. Permeability Determination from On-the-Fly Piezocone Sounding. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **131**(5):643-653.
- Ferraz F.M., Miyashiro N.J., Riyis M.T., Cunha R.C.A. 2015. Estudo da condutividade hidráulica obtida em ensaios de campo: infiltração em sondagens e *slug test* em poços de monitoramento. *InterfacEHS, Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade*, **10**(1).
- Fetter C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Geoprobe Systems. 2013. Geoprobe® DI Webinar: Using HPT Logs for Site Characterization. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=UMVQdeXfP8&t=749s>. Acesso 06.fev.2017.
- Geoprobe Systems. 2017. *HPT - K6050 (1.5 / 1.75 in. System)*. URL: <http://geoprobe.com/tool-string-diagrams/hpt-k6050-15-175-system>. Acesso 13 fev. 2017.
- Köber R., Hornbruch G., Leven C., Tischer L., Großmann J., Dietrich P., Weiß H., Dahmke A. 2009. Evaluation of Combined Direct-Push Methods Used for Aquifer Model Generation. *Ground Water*, **47**(4):536-546.
- Lessoff S.C., Schneidewind U., Leven C., Blum P., Dietrich P. Dagan G. 2010. Spatial characterization of the hydraulic conductivity using direct-push injection logging. *Water Resources Research*, **46**(12). W12502. 9p.

- 
- Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. New York: Blackie Acad., EF Spon/Routledge Publ.
- McCall W., Christy T. 2010. *Development of hydraulic conductivity estimate for the hydraulic profiling Tools (HPT)*. Abstract and presentation. The 2010 North American Environment Field Conference Exposition. The Nielsen Field School, N.M.
- McCall W. 2010. *Tech Guide for Calculation of Estimated Hydraulic Conductivity (Est. K) Log from HPT Data*. URL: <http://geoprobe.com/literature/tech-guide-for-estimating-k-using-hpt>. Acesso 09 jan. 2017.
- McCall W., Butler J.J., Healey J.M., Lanier A.A., Sellwood S.M., Garnett E.J. 2002. A Dual-Tube Direct-Push Method for Vertical Profiling of Hydraulic Conductivity in Unconsolidated Formations. *Environ. & Eng. Geosc.*, **8**(2): 75-84.
- McCall W., Christy T.M., Pipp D., Terkelsen M., Christensen A., Weber K., Engelsen P. 2014. Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt). *Groundwater Monit. & Remed.*, **2**(34):84-95.
- Nielsen D.M. 2006. *Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring*. 2 ed. Florida: Taylor & Francis Group. 1330 p.
- Paradis D., Tremblay L., Lefebvre R., Gloaguen E., Rivera A., Parent M., Ballard J.M., Michaud Y., Brunet P. 2014. Field characterization and data integration to define the hydraulic heterogeneity of a shallow granular aquifer at a sub-watershed scale. *Environ. Earth Sci.*, **72**(5):1325-1348.
- Robertson P.K. 2010. Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. In: International Symposium on Cone Penetration Testing, 2<sup>nd</sup>, 2010, Proc... Huntington Beach, CA, USA: CPT'10, 2010.
- Schnaid F., Odebrecht E. 2012. *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2 ed. São Paulo: Ofic. Textos.
- Sellwood S.M., Healey J.M., Birk S., Butler J.J. 2005. Direct-Push Hydrostratigraphic Profiling: Coupling Electrical Logging and Slug Tests. *Ground Water*, **43**(1):19-29.
- Vianna M.G.R., Gomes O.F., Lima P., Schneider R.P. 2016. Técnicas em investigação de alta resolução para caracterização de aterros. *X Seminário EKOS Brasil*. São Paulo, 2016. URL: [http://seminario.ekosbrasil.org/wp-content/uploads/2016/10/1\\_Marilda-Viana-Ekosbrasil\\_The-Application-of-High-Resolution-Investigation\\_Marilda-Viana\\_V7.pptx](http://seminario.ekosbrasil.org/wp-content/uploads/2016/10/1_Marilda-Viana-Ekosbrasil_The-Application-of-High-Resolution-Investigation_Marilda-Viana_V7.pptx). Acesso 13 fev 2017.
- 

**RESUMO:** Estimar a condutividade hidráulica ( $K$ ) e sua variabilidade espacial é essencial para a caracterização de áreas contaminadas. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica de técnicas *direct push* para perfilagem de condutividade hidráulica que estão ganhando espaço dentro do cenário brasileiro. São analisados *slug tests* em poços, *direct push slug test* (DPST), piezocone (CPTu), *direct push injection logger* (DPIL) e *hydraulic profiling tool* (HPT). Ferramentas *direct push* trabalham com maior resolução espacial e de forma mais rápida; no entanto, podem ser usadas apenas em materiais inconsolidados devido à dificuldade de penetrar materiais rígidos. Esta limitação não se aplica a ensaios de *slug tests* em poços, os quais apresentam menor resolução em função do comprimento da seção filtrante. O DPST fornece valores de  $K$  diretamente, enquanto os valores obtidos com DPIL e HPT são relativos e devem ser correlacionados com valores absolutos de *slug test*. A maioria das correlações usadas foram desenvolvidas em regiões de clima temperado e frio, cujos solos diferem substancialmente dos solos tropicais e sua aplicação a solos brasileiros deve ser validada. Esta é uma linha de pesquisa a ser incentivada em regiões tropicais. No contexto brasileiro, os *slug tests* ainda são vantajosos e uma alternativa para melhorar sua resolução é evoluir para seções filtrantes menores.

**Palavras-chave:** Condutividade Hidráulica, CPTu, DPIL, HPT, *slug test*, solos tropicais.