ENSAIOS DE PERMEABILIDADE TIPO “OPEN END HOLE” & “SLUG TEST”



CTA Meio Ambiente S. A.
CGA Linhares

Linhares - ES

1. INTRODUÇÃO

O presente Relatório Técnico apresenta a metodologia empregada e os resultados obtidos após a execução de ensaios de permeabilidade "*in situ*" na zona saturada e na zona insaturada do aquífero livre localizado na área em licenciamento ambiental para implantação do aterro sanitário da empresa VITAL Engenharia Ambiental, denominada Central de Gestão Ambiental – CGA Linhares.

Os ensaios foram realizados nas proximidades de pontos onde previamente foram realizadas sondagens de investigações geotécnicas tipo SPT, utilizando-se dos métodos de avaliação denominados "Slug Test", para a zona saturada e "Open end Hole", para a zona insaturada.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal é avaliar o comportamento médio da permeabilidade vertical "*in situ*" na zona insaturada em dois intervalos lito/geotécnicos superficiais caracterizados previamente pela sondagens da empresa Sondafuros Sondagens LTDA nas sondagens SP-01, SP-03, SP-04, SP-05, SP-06, SP-10, SP-11, SP-12, SP-13, SP-14 e SP-15, situados nas áreas altas do terreno. Esses intervalos foram denominados camada argilosa amarela superior e camada argilosa avermelhada.

Além disso, se objetivou determinar o coeficiente de permeabilidade "in situ" da zona saturada, pelo menos meio metro abaixo do nível d'água constatado, na parte baixa do terreno, nas imediações dos furos de sondagem SPT: SP-07, SP-08 e SP-09. Foram construídos piezômetros ao lado de cada ponto de sondagem para realizar os testes.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1. Contexto Geológico-Geomorfológico

À área de estudo está situada geologicamente nos sedimentos recentes da Formação Barreiras, que em geral possuem granulometria desde a faixa da argila até areia muito grossa, eventualmente conglomerática, e argissolos desenvolvidos sob os referidos sedimentos.

Os solos da área são mapeados pela EMBRAPA como Neossolo Flúvicos, distrófico, de textura arenosa, que ocupam cerca de 25% da área, ao norte, e Latossolos Vermelho-Amarelos coesos, distróficos, de textura argilosa, que ocupam cerca de 75% da área, na sua porção centro-sul.

Esses sedimentos estão dispostos geomorfologicamente em tabuleiros e planícies fluviais, com relevo suave primordialmente plano a ondulado, inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, Interbacia Hidrográfica do Rio Bananal (IJSN, 2009).

4. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área objeto do estudo localiza-se na região centro-leste do estado do Espírito Santo, na porção centro-sul do município de Linhares, nas proximidades da localidade de Bebea e está contida na carta topográfica Linhares, escala 1:100.000.

O acesso à área pode ser feito partindo de Linhares pela rodovia federal BR 101, seguindo sentido a Vitória, percorrendo aproximadamente 11,8 km, onde se avista um trevo em frente a empresa WEG entrando à direita e acessando uma via vicinal rural por onde se segue por mais cerca de 5,2 Km até alcançar a área.

5. METODOLOGIA

5.1. Open end Hole

Para a determinação dos valores de permeabilidade vertical nas zonas saturadas aplicou-se o método denominado “Open end Hole”, que conforme ABGE, 1996, são classificados como ensaio de rebaixamento, realizado com carga variável (flutuação do nível d’água) e com injeção de água, na zona não saturada do aquífero, têm como principal característica direcionar a infiltração da água verticalmente possibilitando a avaliação do potencial superficial dos solos à recarga nos períodos de excedente hídrico.

Esses ensaios de infiltração in situ representam uma série de metodologias utilizadas para estimar as condutividades hidráulicas verticais (Kv) do meio testado. São mais vantajosos em relação aos métodos de laboratório, pois são mais rápidos, de baixo custo e não exigem a retirada de amostras deformadas ou indeformadas do material a ser testado. Os experimentos montados no campo medem a relação da taxa de água infiltrada no tempo necessário para sua percolação e visam definir a condutividade hidráulica/permeabilidade da porção não saturada dos solos. Os ensaios de infiltração ou testes de permeabilidade são definidos com base no diferencial de pressão exercido

no meio, e medem a quantidade de água infiltrada verticalmente na superfície do solo ou em profundidade (ABGE, 1996).

Os ensaios de infiltração pelo método "open end hole", foram realizados em poços perfurados com diâmetro de 100mm, com uso de trado mecânico, até a profundidade correspondente à metade da espessura da camada superficial de argila amarelada e, na camada argilosa avermelhada, a uma profundidade de aproximadamente um metro abaixo de seu topo (ver tabela 1), profundidades estas baseadas nos boletins de perfuração da Sondafuros.

Profundidades dos Ensaios "Open end Hole" (m)		
Furo	Argila Amarela	Argila Vermelha
SP-01	1,40	3,80
SP-03	1,40	3,70
SP-04	1,40	3,80
SP-05	1,60	4,20
SP-06	1,40	3,80
SP-10	0,93	2,80
SP-11	1,40	4,00
SP-12	1,40	3,70
SP-13	1,45	3,70
SP-14	1,45	3,90
SP-15	2,90	6,80

Tabela 01 – Profundidades as quais se realizaram os ensaios de infiltração pelo método “open end hole” nas duas camadas estudadas.

Após a perfuração alcançar a profundidade onde se desejou realizar o teste se encheu o furo com água até um quarto de sua extensão a fim de saturar o meio e só assim realizar o ensaio, evitando-se assim leituras de permeabilidade incoerentes.

Nestas profundidades foram introduzidos e cravados no fundo os tubos de PVC, com diâmetro de 75mm, sendo apenas um dos testes realizados com tubo de PVC de 50mm de diâmetro (SP-11), revestindo toda a extensão do furo (Figura 1). O furo, com as paredes revestidas com o tubo, foi preenchido com água até uma altura inicial qualquer (h0). A água infiltra exclusivamente pela extremidade inferior do poço uma vez que as paredes estão revestidas com o tubo medindo-se as alturas das colunas d'água inicial e final e o intervalo de tempo decorrido para o rebaixamento. A estimativa da condutividade hidráulica é realizada aplicando-se a seguinte equação (adaptada de Earth Manual, 1974):

$$Kv = 2{,}303 \times \frac{R}{4Dt} \times \log\left(h0/ht\right)$$ (eq.1) onde:

Kv= Condutividade Hidráulica vertical (m/s);

R - Raio interno do tubo de PVC (m);

h0 - Coluna d'água inicial;

ht - Coluna d'água final;

Dt - Tempo decorrido para o rebaixamento entre h0 e ht (s).

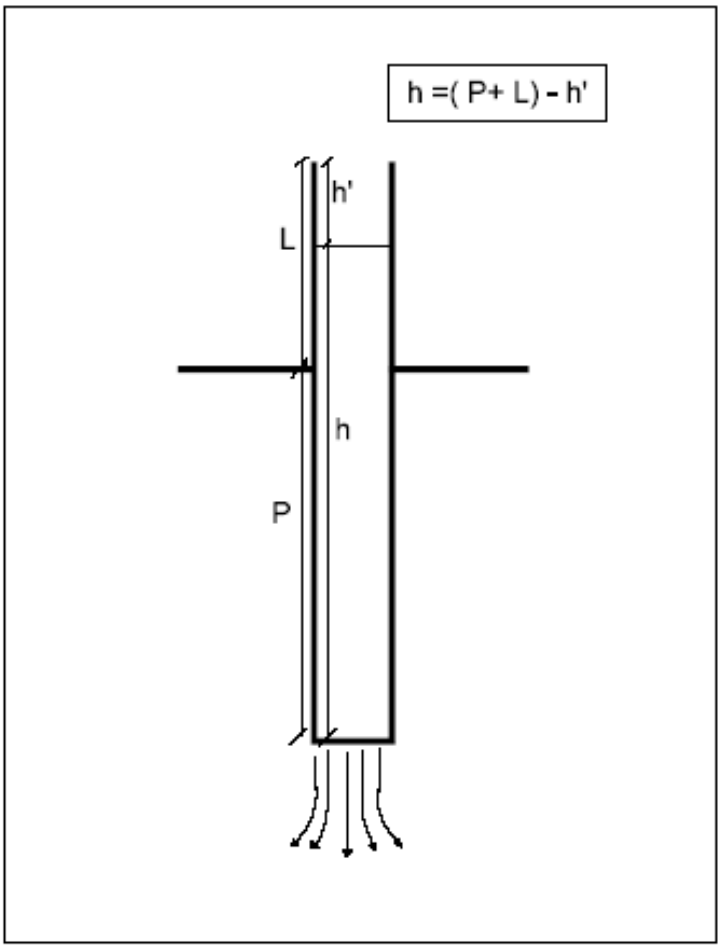


Figura 1 – Ilustração esquemática do método "open end hole".

Em cada ensaio foram realizadas várias medidas, a cada 10 minutos, para verificação da variação da condutividade hidráulica vertical com o tempo (Hi/Ht) e o cálculo final levará em consideração o h inicial e o final (as tabelas em anexo apresentam os valores obtidos).

5.2. .Slug Tests

O slug teste é um teste de campo realizado em poços de observação ou poços de aproveitamento

de recursos hídricos, comumente utilizado para determinação de parâmetros hidráulicos dos poços e caracterização das propriedades hidrogeológicas do aqüífero. Esse teste consiste basicamente no lançamento de um volume conhecido de água ou objeto com volume conhecido, no poço em estudo e a observação da subida do nível e o tempo de recuperação do nível estático inicial, como ilustra a figura a seguir.

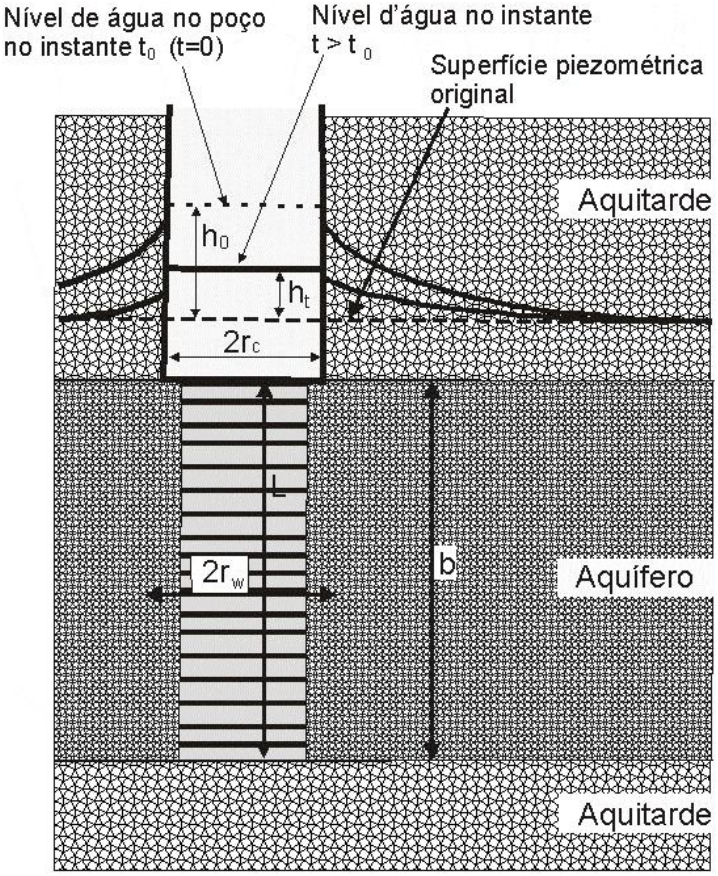


Figura 2 – Perfil esquemático de um poço hipotético mostrando a evolução de slug teste. (onde rw é o raio de perfuração do poço, rc é o raio do revestimento do poço, b é a espessura do aqüífero).

Nos trabalhos de campo realizados para esse relatório foram executados três slug testes em 3 poços de observação diferentes (PZ-07, PZ-08 e PZ-09), imediatamente próximos aos furos SPT SP-07, SP-08 e SP-09, respectivamente.

Primeiramente foi medido o nível estático dos piezômetros, depois lançado um volume de 10 litros de água no interior de cada piezômetro a uma vazão de cerca de 4 x 10^{-4} m³/s, imediatamente após o lançamento, inseriu-se o medidor de nível no interior do piezômetro e iniciou-se a medida do nível a cada 30 segundos até que o nível se manter estável. Cada ensaio

durou cerca de 10 minutos, entretanto o intervalo de dados entre 0 e 600 segundos é suficiente para a obtenção de dados pois a partir daí a recuperação do nível estático é muito lenta.

5.2.1. Parâmetros Construtivos dos Piezômetros

Os furos onde os piezômetros foram instalados foram perfurados com trado mecanizado, com diametro de 100 milimetros, no dia 03/09/2012. Ressalta-se que só se optou por esse diâmetro em função da ocorrência de material argilo-arenoso muito duro, impenetrável ao trépano da sonda SPT, com cerca de 4 metros de espessura, entre 1 e 5 metros de profundidade, na área.

Se utilizou o tubo de PVC de 25mm de diametro externo como revestimento, posicionando-o centralizado no furo, com tampão de fundo (CAP). Sendo que de 0,1 metros acima do fundo até 0,8 metros do fundo foram feitas ranhuras de aproximadamente 0,75 milimetros. Assim, o comprimento do filtro é de 0,7 metros, em todos os piezômetros avaliados, sempre no intervalo supramencionado.

Como pré-filtro foi utilizada areia quartzoza de granulometria entre 1,50 e 3,0 milimetros, posicionado sempre do fundo até o nível d'água constatado na ocasião da perfuração e completação. A partir do nível d'água constatado adicionou-se bentonita (Compactolite) para isolar a zona saturada da zona insaturada. Esse isolamento teve espessura uniforme em todos os piezômetros construídos, com 0,5 metros.

Do selo de bentonita até 0,5 metros de profundidade foi reinserido no anular o solo local e entre essa profundidade e a superfície, utilizou-se novamente a bentonita como isolante de superfície.

Os perfis construtivos dos piezômetros serão apresentados em anexo.

5.2.2. Soluções Matemáticas Utilizadas

Será apresentada a solução matemática mais comumente utilizadas neste tipo de ensaio, que corresponde ao método proposto por Hvorslev, e que faz parte do sistema de soluções do programa AquiferTest™ 4.0.

A condutividade hidráulica segundo a formula proposta Hvorslev e presente no Aquifer Test é descrita da seguinte forma:

$k = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_L}$ $T_L = \frac{\pi r^2}{FK}$ $FK = \pi r^2 \frac{dr}{dt}$, onde r é o raio do poço de observação testado, L é o comprimento do filtro, R é o raio continuo de inteferência do poço de observação, h é a variação da altura do nível estático e T_L é o tempo para 37% de recuperação.

6. INDICADORES DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS

6.1. Zona Insaturada (Open end Hole)

Os valores de permeabilidade vertical na zona não saturada dos solos são fundamentais para a avaliação das condições de infiltração que controlam a recarga dos aquíferos, bem como sua eficiência (Fiori, 2010). Além desse aspecto, estes resultados também são importantes para estudos de contaminação das águas subterrâneas, pesquisas em projetos de irrigação, análise de perda de solos, avaliação geotécnica e estudos hidrológicos.

Em última análise os valores de Kv dos solos traduzem o funcionamento hídrico das coberturas e controlam diretamente a função filtro dos aqüíferos, desempenhada pela zona não saturada, e a função reguladora, exercida pela porção superior da zona saturada (descarga de base das águas subterrâneas).

Segundo Freeze & Cherry (1979) e Fetter (1994) valores típicos de condutividades hidráulicas/permeabilidades podem ser classificados como: > 10^{-3} m/s muito alta, 10^{-3} a 10^{-5} m/s alta, 10^{-6} m/s moderada, 10^{-7} a 10^{-8} m/s baixa e < 10^{-8} m/s muito baixa. De acordo com a classificação apresentada, o valor de Kv com ordem de grandeza de 10-6 m/s pode ser considerado como limite entre valores altos e valores baixos.

A figura 03 apresentada a seguir mostra os resultados obtidos nos ensaios de infiltração “open end hole” realizados na área, onde se pode notar que os valores de permeabilidade obtidos são da ordem de 10^{-7} a 10^{-9} m/s, isto é, valores considerados baixos a muito baixos, mostrando-se coerentes com as descrições litológicas obtidas para os intervalos testados.

Os ensaios tiveram duração média de 4 horas, entretanto, como apresentaram uma homogeneidade no rebaixamento, para se ganhar tempo, optou-se por realiza-los em 1,5 horas nos furos SP-03, SP-04, SP-05, SP-11, SP-12, SP-13 e SP-14, no intervalo das argilas amarelas, sem prejuízos nos resultados obtidos.

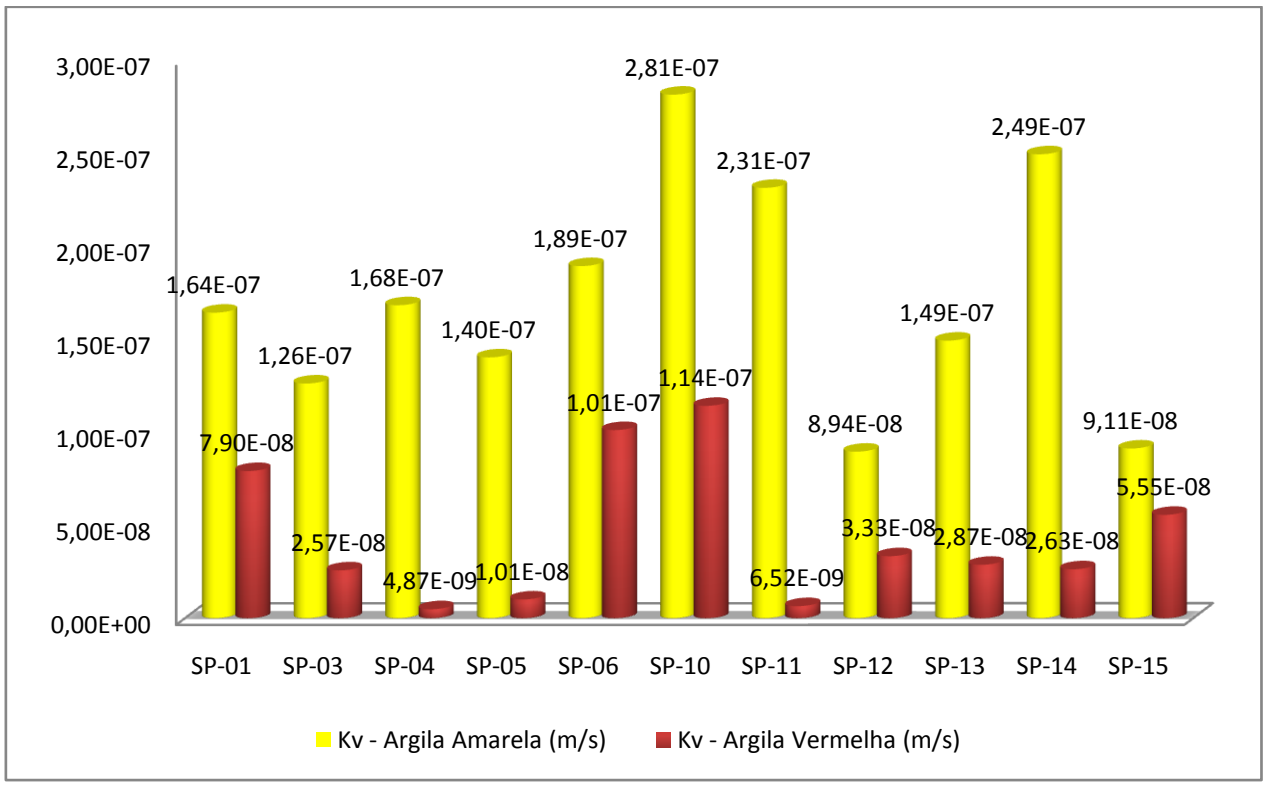


Figura 03 –Sumário dos resultados dos ensaios de infiltração “Open end Hole” realizados

Como pode ser observado na figura acima, o intervalo de argila amarela tem as permeabilidades verticais mais elevadas em relação a argila vermelha, não só devido a compactação mais efetiva que as argilas vermelhas estão submetidas, mas também pela sua constituição.

Os ensaios realizados nas argilas amarelas tem menor variação, apresentando resultados mais homogêneos com resultados entre 10^{-7} e 10^{-8}. Os valores mais elevados podem ser associados a baixa compactação desse horizonte, bem como a presença de siliciclásticos e estruturas que facilitam a percolação e deslocamento de água em seu interior.

Já para as argilas vermelhas, há maior variação, com resultados entre 10^{-7} e 10^{-9}. Os poços SP-01, SP-06 e SP-10, apresentaram valores anômalos em comparação com os poços SP-04, SP-05 e SP-11, por exemplo. Isto pode estar relacionado a uma variação granulométrica local, ou mesmo a estruturação das argilas, fazendo com que aqueles possuam maior permeabilidade em relação aos outros.

6.2. Zona Saturada (Slug Test)

Os ensaios de permeabilidade tipo Slug Tests foram realizados no dia 14/09/2012, abaixo são apresentadas as tabelas com os dados de cada ensaio, a curva de lançamento e recuperação e uma tabela com os resultados obtidos comparando os resultados obtidos manualmente, através de cálculos se utilizando da fórmula em planilha Excel® e em seguida dos resultados obtidos com uso do programa Aquifer Test™ 4.0.

Tempo (s)	Delta h(m)
x	-6,61
0	-5,95
30	-6,09
60	-6,07
90	-6,2
120	-6,17
150	-6,24
180	-6,22
210	-6,25
240	-6,22
270	-6,2
300	-6,27
330	-6,29
360	-6,38
390	-6,46
420	-6,48
450	-6,51
480	-6,48
510	-6,48
540	-6,5
570	-6,52
600	-6,53

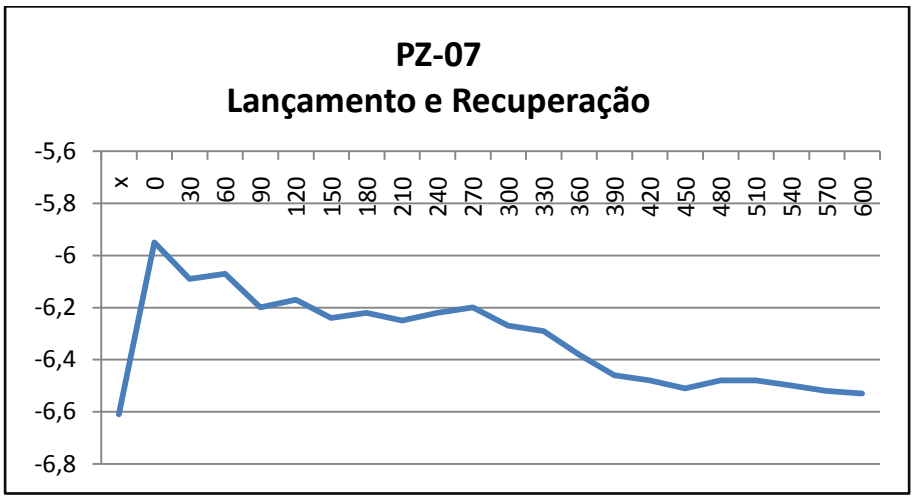


Figura 04 – Curva de lançamento e recuperação do nível estático (delta h VS tempo); tabela de dados do slug test realizado no PZ-07.

Tempo (s)	Delta h(m)
x	-6,44
0	-6,13
30	-6,14
60	-6,16
90	-6,21
120	-6,26
150	-6,3
180	-6,31
210	-6,34
240	-6,36
270	-6,37
300	-6,38
330	-6,4
360	-6,4
390	-6,41
420	-6,41
450	-6,42
480	-6,42
510	-6,42
540	-6,43
570	-6,45
600	-6,43

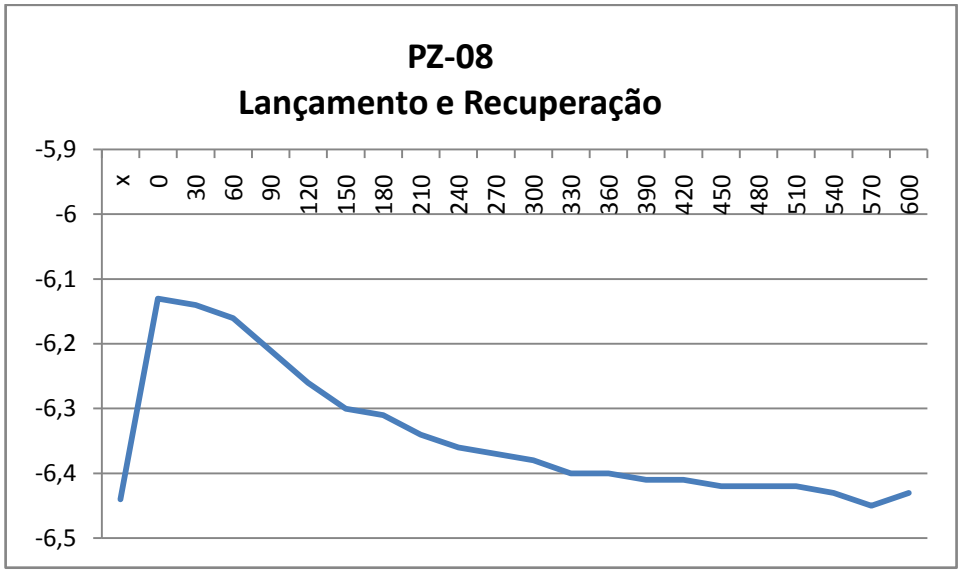


Figura 05 – Curva de lançamento e recuperação do nível estático (delta h VS tempo); tabela de dados do slug test realizado no PZ-08.

Tempo (s)	Delta h(m)
X	-7,48
0	-7
30	-7,03
60	-7,1
90	-7,09
120	-7,13
150	-7,18
180	-7,2
210	-7,21
240	-7,22
270	-7,32
300	-7,3
330	-7,31
360	-7,33
390	-7,35
420	-7,38
450	-7,4
480	-7,41
510	-7,42
540	-7,43
570	-7,44
600	-7,45

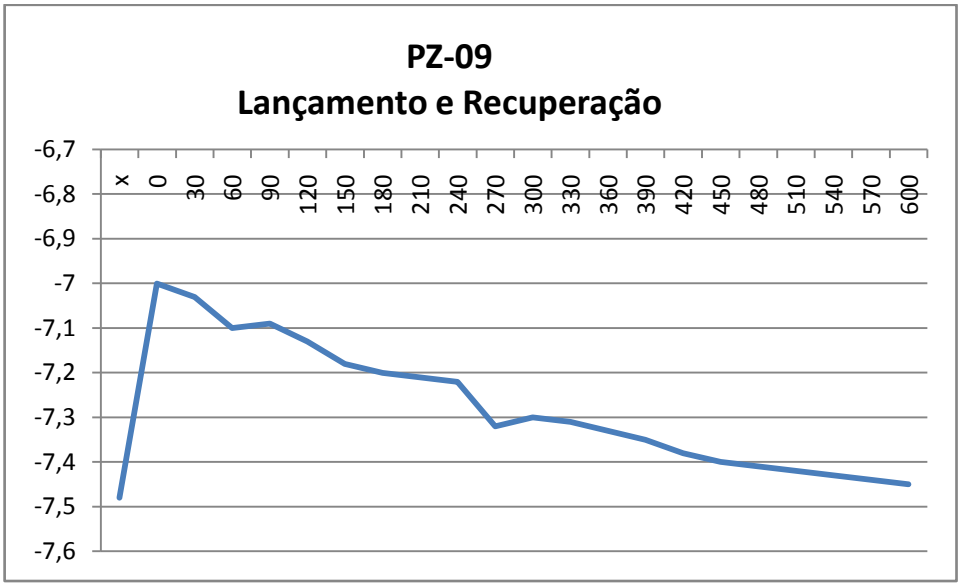


Figura 06 – Curva de lançamento e recuperação do nível estático (delta h VS tempo); tabela de dados do slug test realizado no PZ-09.

Os gráficos apresentam rebaixamento aparentemente linear, a exceção do PZ-07 que apresentou uma espécie de "degrau" que provavelmente se deve a imprecisão do coletor de dados ao realizar a medida do nível, entretanto, sem invalidar o dado, pois claramente se observa a tendência de recuperação. As pequenas alterações visualizadas nos gráficos de recuperação dos PZ-08 e PZ-09 também podem dever-se à imprecisão da tomada de medida manual, contudo, especialmente o PZ-09, apresentou excelente curva de recuperação, com rápida estabilização. O PZ-08 apresentou uma recuperação mais rápida até cerca de 330 segundos, a partir de quando a recuperação se tornou mais lenta e gradual.

A tabela a seguir apresenta os valores obtidos via cálculo manual, utilizando-se a solução matemática mencionada no item 5.2.2. onde nota-se uma uniformidade entre os valores obtidos nos três piezômetros (obteve-se a mesma potência). Essa característica pode ser atribuída uma correlata homogeneidade do meio poroso em profundidade, na direção NW-SE, onde os PZs locados.

Permeabilidade/Condutividade Hidráulica (K)			
	PZ-07	PZ-08	PZ-09
Hvorslev	1,0958E-06	1,1127E-06	8,8624E-07

Tabela 02 – Comparativo dos valores de K obtidos com os dados dos "*slug tests*", calculados manualmente com uso da solução matemática mencionada no item 5.2.2.

Logo abaixo são apresentados os gráficos obtidos após avaliação dos dados no programa Aquifer Test, com os valores calculados pelo mesmo, notar que esses valores são muito próximos dos calculados manualmente.

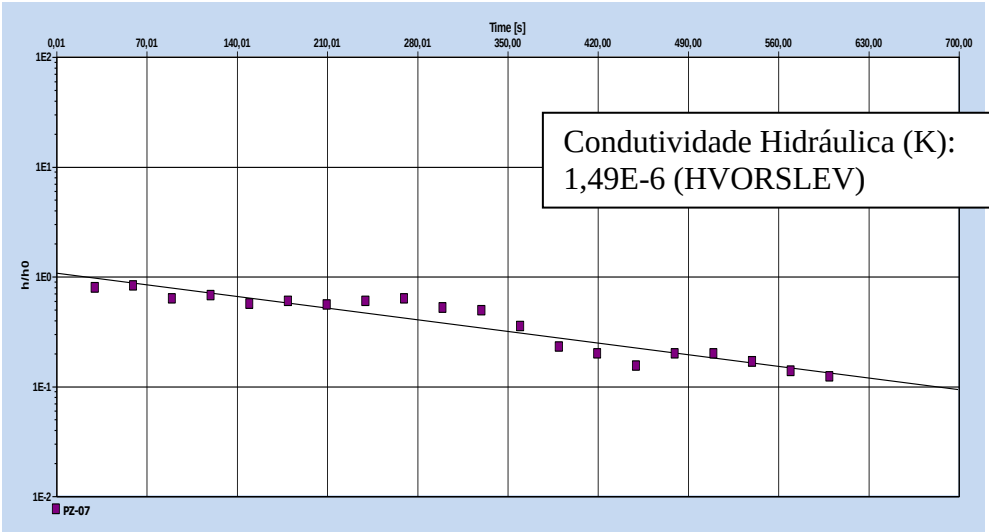


Figura 07 – Gráfico log-log, obtido no programa Aquifer Test™ 4.0, considerando os dados de rebaixamento do PZ-07.

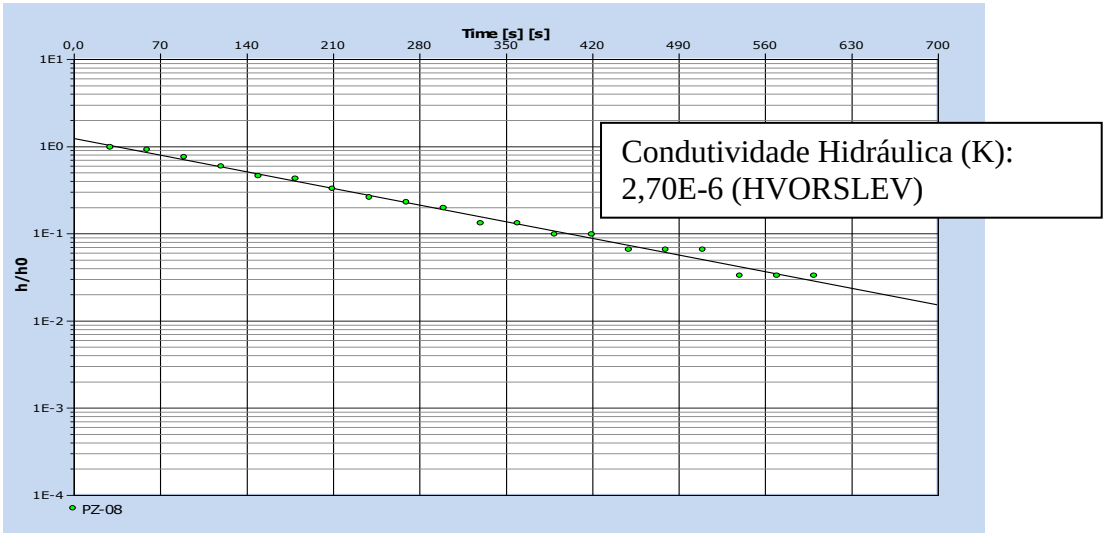


Figura 08 – Gráfico log-log, obtido no programa Aquifer Test™ 4.0, considerando os dados de rebaixamento do PZ-08.

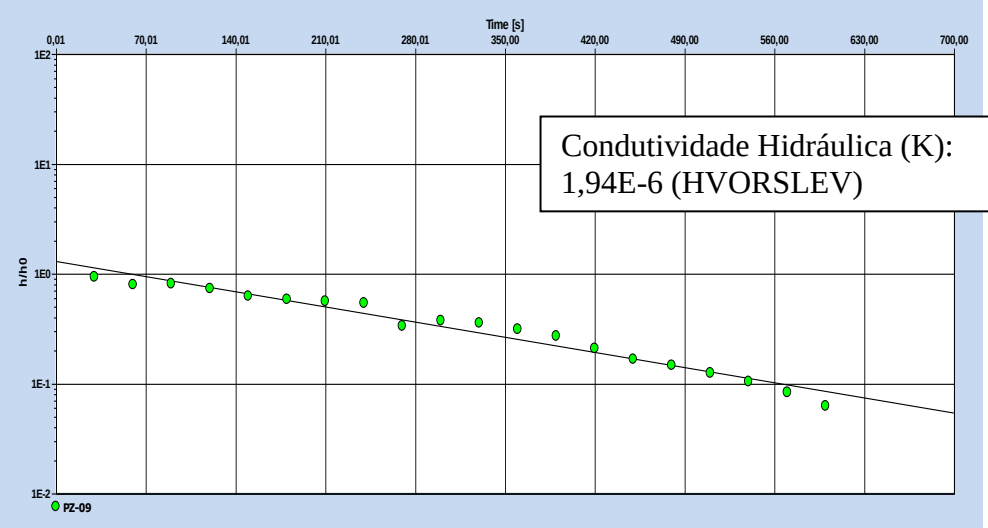


Figura 09 – Gráfico log-log, obtido no programa Aquifer Test™ 4.0, considerando os dados de rebaixamento do PZ-09.

Os valores de K obtidos nos ensaios slug tests forneceram potências consideradas limítrofes entre valores considerados baixos e moderados, conforme mencionado acima no item 6.1, porém, coerentes com as características geológicas do meio poroso da zona saturada.

Segundo descrição geotécnica apresentada pela Sondafuros e observações em campo, os intervalos onde foi observado o nível d'água e instalado a seção filtro para realização dos ensaios corresponde a uma areia argilosa com percentagem de pedregulho. De fato, nossa equipe não observou grande concentração da fração argila nesse intervalo e sim da fração areia, encontrando inclusive dificuldades para prosseguir a perfuração, em função da desagregação/ameaças de colapso do furo.

De posse desses valores pode-se, a título de ilustração, estimar que na zona insaturada, considerando os valores de K obtidos (entre 10^{-7} e 10^{-9}), uma pluma de um contaminante, ou mesmo de água da chuva, desconsiderando parâmetros como viscosidade, evaporação, bioturbação e etc., pode migrar verticalmente cerca de 0,0077 a 0,0242 metros por dia podendo chegar a migrar entre 2,82 a 8,84 metros por ano nas argilas amarelas e entre 0,0004 a 0,0099 metros por dia podendo chegar .a migrar entre 0,1537 a 3,6030 metros por ano nas argilas vermelhas (Figuras 10 e 11).

Conforme foi observado, os valores de permeabilidade vertical variam com a profundidade, em função da compactação, mas também em função da constituição lito/pedológica do meio, assim, esse cálculos são uma tentativa de ilustrar onde deve-se ter maior atenção com relação à

contaminação do aquífero livre, baseado nos dados de permeabilidade obtidos nas profundidades investigadas.

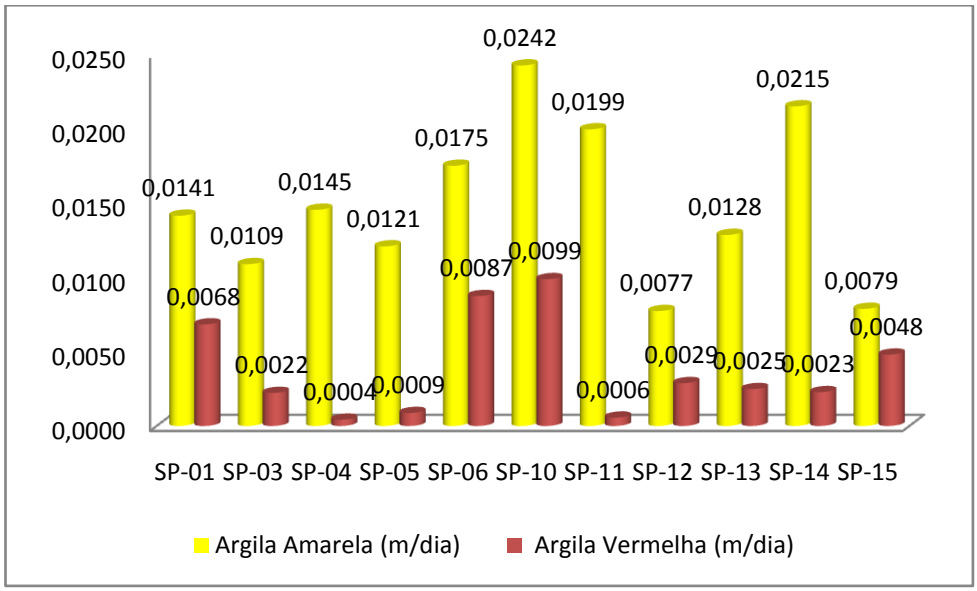


Figura 10 – Gráfico apresentando sumário de resultados obtidos para a simulação do deslocamento de uma pluma em (m/dia), utilizando-se a permeabilidade obtida no método "*open end hole*".

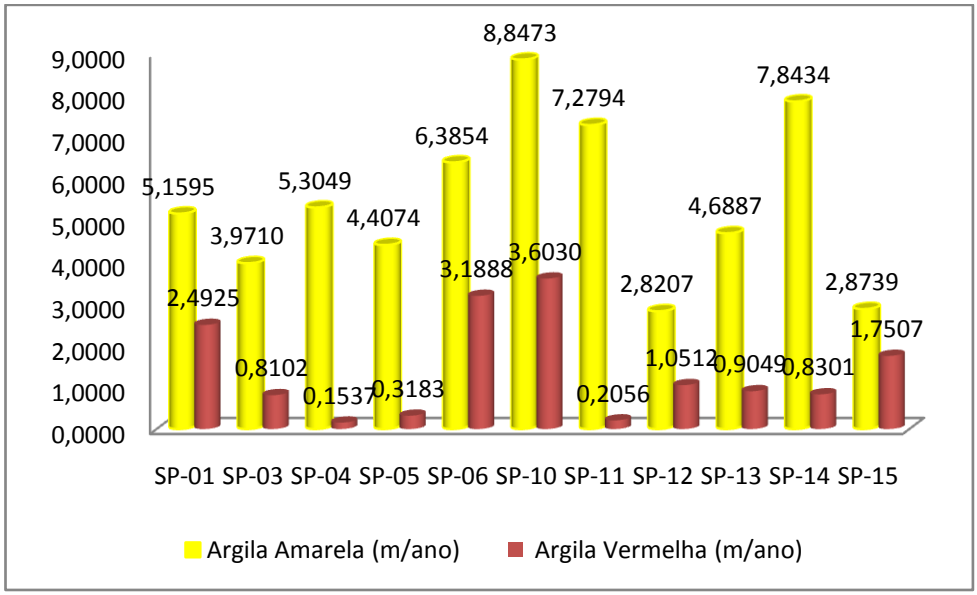


Figura 11 – Gráfico apresentando sumário de resultados obtidos para a simulação do deslocamento de uma pluma em (m/ano), utilizando-se a permeabilidade obtida no método "*open end hole*".

7. Referências Bibliográficas

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Ensaios de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo. 3 ed. Boletim, n. 4, 35 p., 1996.

BOTTURA, 2008 – Perfuração e Instalação de Poços de Monitoramento. Apostila de Curso da Associação de Empresas de Solos e Águas Subterrâneas – AESAS.

BOTTURA, 2008 – Amostragem de Água Subterrânea em Poços de Monitoramento. Apostila de Curso da Associação de Empresas de Solos e Águas Subterrâneas – AESAS.

EARTH MANUAL. The Water Resources Technical Publication: A guide to the use of soils as foundations and as construction materials for hydraulic structures. Washington D.C., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2 ed., 810 p., 1974.

FETTER, C.W. Applied Hydrogeology. 3 Ed. New York: MacMillan College Publisher Co., 691 p., 1994.

FIORI, J.P.O. Avaliação de Métodos de Campo para a Determinação de Condutividade Hidráulica em Meios Saturados e Insaturados. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB, 110p., 2010.

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. Groundwater. New York: Prentice Hall, 604 p., 1979.

NBR 15495-2: 2009 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares

RESOLUÇÃO CONAMA 396, de 3 de abril de 2008.

ANEXOS