

INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL DE ÁREAS CONTAMINADAS COM ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL EM CAMPO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ALTA RESOLUÇÃO (HRSC)



MARCOS TANAKA RIYIS

ECD Sondagens Ambientais Ltda. Sorocaba-SP

E-mail: marcos@ecdambiental.com.br

HERALDO LUIZ GIACHETI

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, Bauru-SP

E-mail: giacheti@feb.unesp.br

RAFAEL MURARO DERRITE

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da FEB/UNESP; ECD Sondagens Ambientais Ltda. Sorocaba-SP

E-mail: rafael@ecdambiental.com.br

MAURO TANAKA RIYIS

ECD Sondagens Ambientais Ltda. Sorocaba-SP

E-mail: mauro@ecdambiental.com.br

RESUMO ABSTRACT

As investigações geoambientais de áreas contaminadas no Brasil, em geral, não estabelecem um Modelo Conceitual da Área (conhecido no mercado como Modelo Conceitual do Site (MCS)) adequado. Os estudos são, em sua maioria, inadequados e há um grande desconhecimento sobre o meio físico, gerando dados inconsistentes que vão nortear avaliações de risco e projetos de remediação com muitas incertezas, o que leva uma demora no encerramento dos casos, remediações ineficientes e custos globais mais altos. Para elaborar um MCS adequado, é necessário que seja dada prioridade à etapa de coleta de dados. Isso requer o uso de ferramentas de alta resolução, mais eficazes que as tradicionais, que possibilitem obter dados em escala de detalhe e que, preferencialmente, as decisões sejam tomadas em campo. Este trabalho apresenta e discute resultados de investigações geoambientais com tomada de decisão em campo e com uso de ferramentas de alta resolução em conjunto com ferramentas tradicionais.

The Brazilian geo-environmental site characterizations usually do not provide a suitable Conceptual Site Model (CSM). Site assessments are mostly inappropriate and there is a lack of knowledge about the subsurface environment, generated by inconsistent data that will guide risk analyses and remediation projects full of uncertainties, causing delay on closing cases, inefficient remediation and higher global projects costs. The step of data collection must have high priority to develop a suitable CSM, and it demands more effective high resolution site characterization (HRSC) tools than the traditional ones and, preferably, the decision-making have to be done in the field. This paper presents and discusses two geo-environmental site characterization results, in which the decision-making was done in the field based on high resolution site characterization (HRSC) used together with the traditional ones. These site investigations provided a significant time saving, allowed the detection of subsoil heterogeneities, a

Estas investigações proporcionaram uma economia significativa de tempo, permitiram a detecção das heterogeneidades, um entendimento adequado do meio físico, e possibilitaram que se elaborasse um MCS sólido e em tempo real. Esses MCS podem subsidiar projetos de remediação baseados em dados mais confiáveis que aqueles que seriam obtidos em investigações tradicionais, preocupadas somente em seguir apenas as regras estabelecidas pelos órgãos ambientais.

Palavras-chave: Investigação geoambiental, Modelo conceitual, Abordagem TRIAD, Investigação de alta resolução, Remediação de áreas contaminadas.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama Atual

Como regra geral, as investigações geoambientais de áreas contaminadas no Brasil, não estabelecem um Modelo Conceitual da Área (também chamado de Modelo Conceitual do *Site* - MCS) adequado, com as incertezas gerenciáveis. Para Aquino Neto (2009), os relatórios não possuem a qualidade necessária porque consideram um MCS único para todas as áreas, as plumas não são corretamente mapeadas (muitas sequer são delimitadas), as fontes não são identificadas, nem o centro de massa dessas plumas. As investigações, portanto, são inadequadas e há um desconhecimento muito grande sobre o meio físico, gerando dados de baixa qualidade e inconsistentes que vão nortear avaliações de risco e projetos de remediação baseados em tais dados, causando demora no encerramento dos casos, remediações ineficientes e custos globais mais altos. Problemas na investigação, portanto, são as maiores causas das falhas nas remediações de áreas contaminadas (CLEARLY, 2009).

Como exemplo da prática cotidiana dos estudos de investigação de áreas contaminadas tem-se a instalação de poços de monitoramento. Estima-se, através de entrevistas informais, que menos de 1% dos poços de monitoramento são instalados após a elaboração de um modelo conceitual hidrogeológico prévio (com sondagens de reconhecimento, ensaios *in situ*, piezômetros, ou mesmo algo simples como amostragem de solo), o que desrespeita a NBR 15.495-1 (ABNT, 2007). Desta forma, os poços são instalados sem que a zona-alvo

proper understanding of the subsurface environmental, and have generated a solid CSM in real-time. These CSM can subsidize remediation projects based on a more reliable data than those that would be obtained in traditional site investigations, concerned just in following the rules established by the environmental agencies.

do monitoramento seja conhecida. Com isso, a descrição do perfil estratigráfico, supostamente feita por descrição tátil-visual da amostra de solo coletada (que raramente é de fato coletada), geralmente não corresponde à realidade. Quase na totalidade dos estudos, a sondagem para a instalação do poço de monitoramento é a única forma de se obter dados para construir o MCS.

Segundo Riyis (2012), as causas principais dos estudos inadequados são:

- **Foco na remediação:** as empresas direcionam seus melhores profissionais para atuar nessa etapa do gerenciamento, investem em pesquisa, desenvolvimento e conhecimento de novas técnicas e objetivam ganhar os contratos para realizar as remediações, ao passo que diminuem ao máximo os custos nas etapas iniciais de diagnóstico (investigação preliminar, confirmatória e detalhada), acarretado na queda de qualidade dessas etapas iniciais, que alicerçam a remediação.
- **Investigação com a abordagem inapropriada:** em consonância com o item anterior, a fim de reduzir custos, a coleta de dados em campo é feita, em geral, por profissionais sem experiência e sem autonomia para tomada de decisão. As decisões são tomadas pelo profissional Sênior que fica no escritório, levando a uma lentidão no processo e gerando a construção de um MCS repleto de incertezas, pois foi elaborado com base em dados deficientes. A investigação é realizada estritamente para cumprir as normas estabelecidas, seguindo uma receita única, sem planejamento e sem uma seleção adequada das ferramentas de investigação para cada caso.

- **Técnicas inadequadas de investigação:** Por questões relativas aos custos e/ou por desconhecimento sobre as tecnologias disponíveis, os diagnósticos são realizados exclusivamente através do binômio: Amostragem de solo por cravação contínua (*Direct Push*) + Instalação de poço de monitoramento. Mesmo quando realizada de forma adequada, essas técnicas, usadas isoladamente, se mostram ineficientes, pouco representativas e com muitas incertezas associadas, pois não consideram as heterogeneidades do meio físico subterrâneo, que é a variável mais significativa de todo o estudo (QUINNAN, 2012).
- **Erros de execução:** em muitos trabalhos, as boas práticas e as normas técnicas são deixadas de lado, por desconhecimento ou em nome de um custo aparentemente menor.

1.2 Propostas de Mudança

Inicialmente, propõe-se que, depois de confirmada a contaminação da área, seja dada total prioridade para a elaboração de uma investigação verdadeiramente detalhada, que permita a elaboração de um MCS sólido, com incertezas gerenciáveis. Essa mudança de enfoque tende a diminuir os custos do projeto global, embora aumente o custo da investigação (AQUINO NETO, 2009; SINGER & FIACCO, 2010; PITKIN et al, 2014). Essa redução dos custos globais é, nos EUA, da ordem de cinco a dez vezes o valor investido em uma investigação adequada (QUINNAN, 2012). Estudos recentes apontam economia de quatorze vezes no custo

global do projeto, após a realização de uma investigação adequada (PITKIN et al, 2014).

Dentro dessa prioridade para a investigação, deve-se realizar um diagnóstico de qualidade. Para isso, o paradigma atual deve ser invertido, ou seja, é fundamental que a coleta de dados seja privilegiada dentro do projeto, com o melhor profissional participando dessa etapa, tomando as decisões em campo, refinando o MCS durante os trabalhos e finalizando o diagnóstico no menor tempo possível, após elaborar um entendimento adequado do meio físico e suas heterogeneidades.

Para que esse novo paradigma tenha sucesso, é fundamental que não se utilize somente as ferramentas de investigação consagradas e obrigatórias, mas também as ferramentas para investigação de alta resolução, ou *High Resolution Site Characterization (HRSC) tools* (USEPA, 2013). Somente com tais ferramentas será possível identificar as heterogeneidades presentes em escala de centímetros, e estabelecer as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento que são a essência da elaboração de um MCS sólido (RIYIS, 2012; WELTY, 2012, QUINNAN et al, 2010, RIYIS et al, 2014). Na Figura 1 tem-se um amostrador tubular liner, de 1,20 m de comprimento. É possível observar a grande heterogeneidade presente em 1,20 m do perfil, conseqüentemente, uma grande variação de condutividade hidráulica que vai acarretar em fluxos preferenciais de água subterrânea, de migração de contaminantes, de produtos remediadores, de bombeamento, de extração, entre outros.



Figura 1 - Amostra coletada em todo amostrador *liner*, com destaque para sua heterogeneidade

Essa mudança de paradigma somente fará sentido se o profissional que atuará na coleta de dados tiver condições de tomar decisões rápidas em campo. Isso só será possível se ele contar com

uma variedade de ferramentas para aquisição de dados em alta resolução, como:

- Sondagens com coleta de amostras de solo representativas, com grande produção e capazes

de obter amostras da zona saturada (por exemplo: *Dual Tube Sampling, Piston Sampler*) conforme ilustrado na Figura 2.

- Ensaios de Piezocone de Resistividade, ou RCPTu (Figura 3)
- Ensaios pontuais para determinação da condutividade hidráulica como dissipação de poro pressão (PPDT) em solos argilosos e *Direct Push Slug Tests* (DPST) em solos arenosos.
- Coleta de amostras de água discreta em diferentes profundidades.
- Instalação rápida de poços provisórios ou piezômetros de pequeno diâmetro, preferencialmente pré-montados.
- Análise das amostras em campo, com laboratório de análises com respostas rápidas.



Figura 2 – Sonda específica para Cravação Contínua (*Direct Push*) modelo Power Probe 9100-ATV e ferramentas para amostragem de solo tipo *Piston Sampler*

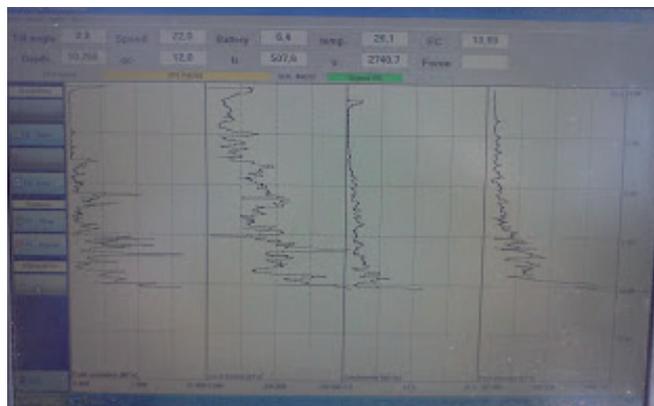


Figura 3 – Sonda preparada para realização do ensaio RCPTu e tela do computador com o resultado do ensaio em tempo real no campo a medida que o mesmo vinha sendo realizado

Todas essas ferramentas estão disponíveis no Brasil, em maior ou menor escala. Seu uso propiciaria uma grande densidade de informações e, conseqüente, um diagnóstico de alta resolução. Com um MCS refinado, sólido e com baixo grau de incertezas, seria possível estabelecer adequadamente a rede de monitoramento e os pontos exatos de coleta de amostras a serem encaminhadas ao laboratório acreditado. Além dessas, existem outras ferramentas muito úteis, que certamente seriam trazidas para o nosso país se as investigações seguirem esse novo paradigma, tais como:

- Direct Push Logging Injection - DPIL (QUINNAN et al, 2010)
- Hydraulic Pressure Test - HPT (McCALL, 2011)
- High Resolution Piezocone - HRP (KRAM et al, 2010)
- Sondas Sônicas

- *Laser-Induced Fluorescence* (LIF) ou *Membrane Interface Probe* (MIP) para a realização de uma varredura (*screening*) qualitativa de concentrações de compostos químicos de interesse.

1.3. O Piezocone de Resistividade (RCPTu)

Todas as ferramentas descritas são úteis para a elaboração de um MCS adequado. Entretanto, muitos autores consideram o “perfil hidroestratigráfico” (o perfil estratigráfico com valores de condutividades hidráulicas em alta resolução) como o componente mais sensível da investigação, pois é o que apresenta maior variação (QUINNAN et al, 2010; VIENKEN et al, 2012). Welty (2012) fala em variação de quatro ordens de grandeza em apenas 1,0 m de profundidade, enquanto Killenbeck (2012) conclui que é essa hidroestratigrafia é quem governa o fluxo e transporte no site.

Welty (2012) cita as seguintes ferramentas como as mais adequadas para estabelecer o perfil hidroestratigráfico de uma área: *Piezocone Penetration Test* (Ensaio CPT com medida de poro-pressão), *Direct Push (DP)*, *Injection methods* (HPT ou *Waterloo Profile*), EC (Condutividade Elétrica), Ensaio de dissipação de poro-pressão (PPDT) e *DP Slug Test*.

Estudo realizado por Quinnan et al (2010) comparou as diversas ferramentas para a elaboração do perfil hidroestratigráfico e mostrou uma boa correlação entre medidas diretas (Pneumatic Slug Test e DPIL) e medidas indiretas do ensaio RCPTu: poro-pressão, resistência de ponta e condutividade elétrica. Vienken et al (2012) utiliza o ensaio CPTu como ferramenta fundamental para investigação geambiental de alta resolução, pois permite a elaboração de um perfil hidroestratigráfico adequado. Schulmeister et al (2003) diz que o sensor condutividade elétrica (EC) é uma ferramenta poderosa para investigação em alta resolução, quando comparando aos métodos tradicionais disponíveis para se obter o perfil hidroestratigráfico da área. Assim, o sensor de EC incorporado ao um ensaio CPTu (portanto, o ensaio RCPTu) é uma técnica mais eficiente, rápida, barata, de maior resolução, a qual fornece uma maior densidade de dados, sem prejuízo da qualidade mesmos. Um estudo realizado por McCall (2011) demonstra a eficiência da ferramenta HPT

para obtenção de valores relativos de “K” em um perfil de alta resolução. Uma das comprovações apresentadas para demonstrar a eficiência da ferramenta HPT foi por meio da comparação de resultados com aqueles obtidos com o sensor de EC. Essa comparação indica que o ensaio RCPTu tem uma excelente correlação com as ferramentas que possibilitam a obtenção de perfil hidroestratigráfico em nível de detalhe.

O presente trabalho mostra dois estudos de caso, ambos em áreas contaminadas por combustíveis, quais sejam: uma antiga garagem e a área de manutenção de frota de caminhões na cidade de São Paulo-SP, e a outra em um posto de combustíveis na cidade de Sorocaba-SP. Nos dois casos, a tomada de decisão ocorreu em campo e o MCS foi sendo elaborado em tempo real com o uso de ferramentas de alta resolução (HRSC), em uma abordagem que se aproxima da “Triade”, ou seja, aquela denominada *Triad Approach* (SINGER e FIACCO, 2010; CRUMBLING, 2004)

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro estudo de caso foi realizado no município de São Paulo-SP, em uma antiga área de abastecimento e manutenção de caminhões contaminada por combustíveis, com cerca de 3.000 m², localizada dentro da área urbana da cidade, na várzea de um córrego canalizado. Estudos anteriores, realizados entre 2002-2012 empregando técnicas tradicionais, indicaram, inicialmente, a presença de fase livre menos densa que a água (LNAPL) e fase dissolvida de benzeno, xilenos e Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH) nos poços de monitoramento. Uma remediação por Extração de Vapores do Solo (SVE) e bombeamento e tratamento foi realizada entre 2004 e 2008, onde as concentrações foram reduzidas a níveis abaixo das concentrações determinadas na avaliação de risco à saúde humana. Na etapa de monitoramento para encerramento do caso, observou-se novamente o aparecimento de fase livre em alguns poços, o que motivou a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a exigir uma nova investigação. O presente estudo de caso foi realizado como parte de uma avaliação detalhada das fontes e plumas para a conclusão da negociação de compra e venda da área. O nível

de água (NA) variava entre 4,0-6,0 m de profundidade e o solo era predominantemente argiloso na porção superior, com finas intercalações de areia, até a alteração da rocha, que se iniciava entre 7,0-9,0 m e o topo rochoso em cerca de 9,0 m-15,0 m de profundidade.

O estudo teve início com amostragens de solo *Direct Push* para a delimitação da fase retida e residual na zona saturada. A seguir, uma campanha de ensaios RCPTu foi realizada. Em conjunto com

esses ensaios, também foram realizados alguns ensaios de dissipação de excesso de poro pressões (PPDT), nos pontos de poro pressão era elevada. Após a determinação das zonas de fluxo e armazenamento através da interpretação dos resultados no próprio campo, foram realizados ensaios DPST nas zonas de fluxo, com abertura de seção filtrante de 0,30 m de comprimento. Um resultado típico de um ensaio RCPTu visto é apresentado na Figura 4.

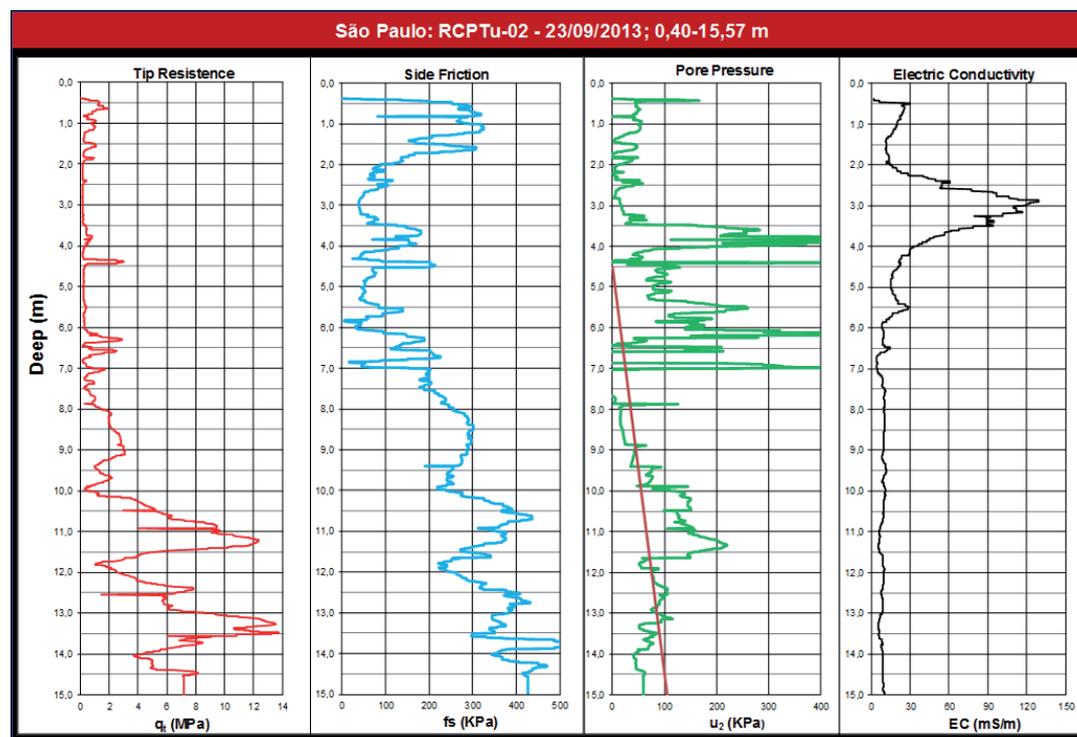


Figura 4 - RCPTu R-02 - São Paulo

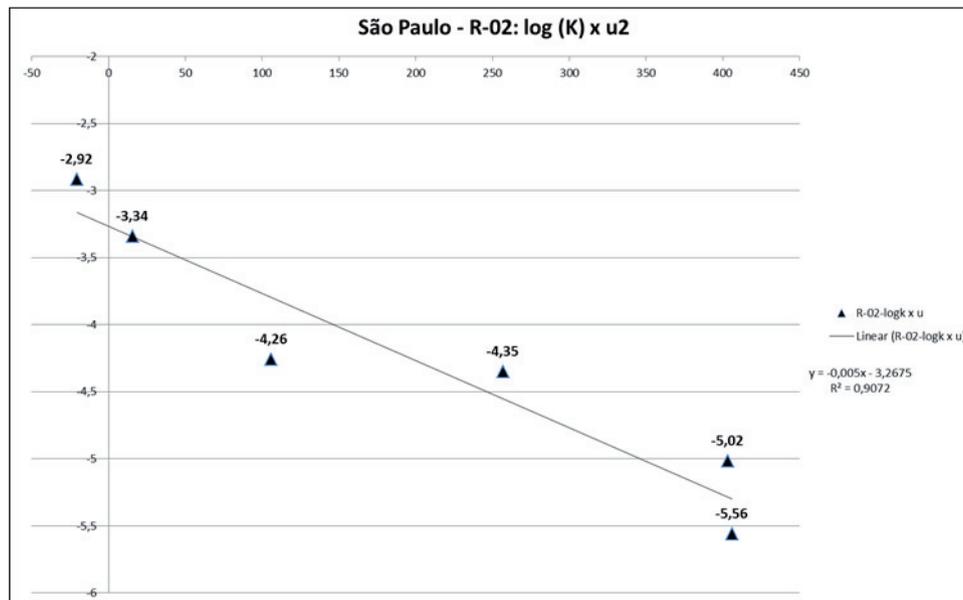
Pode-se observar nessa figura que, na zona vadosa, há um aumento significativo da condutividade elétrica, que, posteriormente, se mostrou consistente com a contaminação de hidrocarbonetos em fase retida no solo. O gráfico de poro pressão (u) indica condutividade hidráulica (K) muito baixa até 7,0 m, com duas zonas pequenas de K mais elevada, uma entre 4,0 m e 4,5 m e outra entre 6,2 m e 6,5 m de profundidade. Entre 7,0 m e 10,0 m, parece haver uma zona preferencial de fluxo, seguida por uma zona preferencial de armazenamento, entre 10,0 m e 11,5 m de profundidade, para novamente haver uma zona preferencial de fluxo (essa última próxima da rocha alterada). Essa identificação foi feita em campo,

logo após a realização do ensaio e orientou o posicionamento dos DPST pontuais. Nesse local, os DPST foram realizados nas profundidades: 5,10-5,40 m (para verificar K na zona de armazenamento logo abaixo do pico de EC); 6,10-6,40 m (tentando avaliar a zona de fluxo pouco espessa nessa região); 6,75-7,05 (tentando verificar a influência do pico de poro pressão, correspondente a um K extremamente baixo); 7,10-7,40 m (zona preferencial de fluxo mais intenso); 7,90-8,20 m (zona preferencial de fluxo). Nas profundidades 5,52 m e 6,18 m foram realizados PPDT. Os resultados de condutividade hidráulica determinados a partir dos ensaios DPST e PPDT são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de condutividade hidráulica (K) em um ponto da área investigada.

Profundidade (m)	K (cm/s)	Ensaio
5,10-5,40	3,46E-06	DPST
5,52	4,48E-05	PPDT
6,10-6,40	5,52E-05	DPST
6,18	2,75E-06	PPDT
6,75-7,05	6,64E-07	DPST
7,10-7,40	1,21E-03	DPST
7,90-8,20	4,56E-04	DPST

Os dados pontuais de K em cada profundidade ensaiada, obtidos através dos ensaios DPST e PPDT foram comparados com valores de poro pressão de cravação determinados empregando o ensaio RCPTu e, deste modo, estabelecido um modelo que correlaciona o valor da poro pressão (u_2) com o $\log(K)$. A relação encontrada para o ponto R-02 investigado é apresentada na Figura 5. Nota-se que o valor do coeficiente de determinação ($R^2=0,9072$) é elevado, o que possibilita assumir uma correlação entre essas duas grandezas para ser empregada apenas nessa área de estudo.

**Figura 5** – $\log(K)$ x poro pressão estabelecida para o ponto R-02 da área investigada.

A partir dessa correlação, foi estabelecido perfil de variação de K para o ponto R-02 (Figura 6). Como o nível de água foi identificado a 5,15 m de profundidade, o perfil de variação de K deve ser considerado apenas partir dessa profundidade. Observa-se uma variação próxima de

3 ordens de grandeza nos valores de K. Com o perfil de K obtido em cada um dos pontos investigados foi elaborada uma seção e, posteriormente, poderia ser feito um diagrama de cerca que possibilitaria elaborar um mapa tridimensional das condutividades hidráulicas.

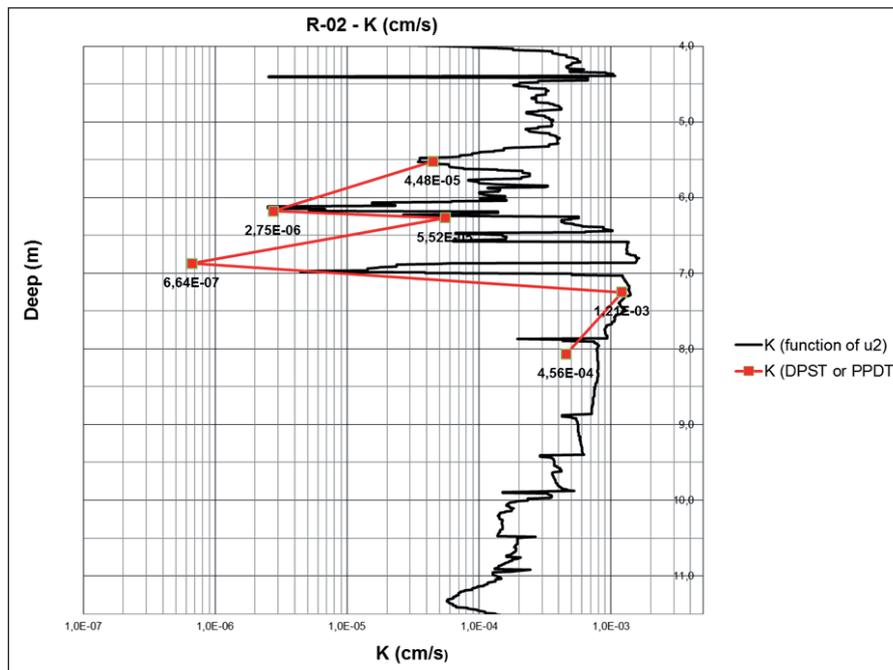


Figura 6 – perfil de K (R-02)

Foram coletadas, além das amostras de solo para delimitação de fase retida, amostras de água subterrânea para análise em laboratório de campo, que serviram como *screening* de concentrações. Constatou-se que houve uma correlação muito boa entre a fase retida e os valores de condutividade elétrica, mostrando que, nessa área, o sensor de EC pôde ser empregado como ferramenta auxiliar para delimitação qualitativa da fonte secundária, onde a difusão é o principal mecanismo de transporte. A relação desses resultados com o perfil de K permitiu a identificar as fontes primária e secundária, a delimitar as plumas e elaborar um modelo tridimensional da contaminação, possibilitando utilizar o cálculo de fluxo de massa (NICHOLS, 2010) e consequentemente elaborar um projeto de remediação adequado.

O *screening* de concentrações em fase dissolvida foi realizado coletando-se a água subterrânea via *Direct Push* nas zonas-alvo determinadas a partir do perfil hidroestratigráfico elaborado. As zonas-alvo foram as zonas de fluxo e as camadas imediatamente abaixo das maiores concentrações em fase retida no solo. A análise da distribuição da contaminação não fez parte do escopo desse trabalho, porém, foi possível observar que os resultados foram os esperados, com as maiores

concentrações associadas às zonas superficiais de menor K, indicando que a remediação anterior removeu massa da zona de fluxo, cujo principal mecanismo de transporte é a advecção e não obteve sucesso na zona de armazenamento, cujo mecanismo de transporte é a difusão. O uso de apenas um método de *varredura* de concentrações (LIF ou MIP) isolado não forneceria as informações da geologia/hidrogeologia, portanto, não permitiria estabelecer a correlação necessária entre o meio físico e a contaminação. A coleta pontual de amostras de água via *Direct Push* e a análise em laboratório de campo permitiu realizar uma varredura de concentrações adequada ao nível de detalhamento que o estudo exigia. Com isso, foi possível elaborar um CSM com um grau de detalhamento necessário para uma tomada de decisão adequada, consequentemente, possibilitando elaborar um projeto de remediação com maior eficiência e menor custo.

Nesse caso, comparando com outras técnicas de HRSC, as ferramentas baseadas em injeção de fluido (DPIL ou HPT), isoladas, provavelmente também não trariam resultados consistentes, pois o solo predominantemente argiloso atuaria como fator limitante para o emprego das mesmas. O uso isolado do EC também não seria adequado,

como pode ser visto no log do ensaio RCPTu R-02 (Figura 4). O uso conjunto dos quatro sensores disponíveis em um ensaio RCPTu empregados em conjunto com os ensaios DPST e PPDT tornam a aquisição de dados e o perfil de variação K mais consistente.

No segundo estudo de caso, realizado no município de Sorocaba-SP, a investigação foi realizada em um posto de combustíveis contaminado por benzeno em fase dissolvida. A abordagem foi semelhante à Tríade (CRUMBLING, 2004), no

entanto sem a presença de todos os agentes envolvidos (como CETESB, dono do empreendimento, Ministério Público, entre outros agentes públicos ou privados interessados). Apenas uma equipe técnica multidisciplinar, como pode ser observado na Figura 7, estava presente na área. A investigação realizada utilizou ferramentas de HRSC, como RCPTu e PPDT e algumas tradicionais mais modernas, como amostragem de solo *Direct Push* nas modalidades *Dual Tube* e *Piston Sampler*.

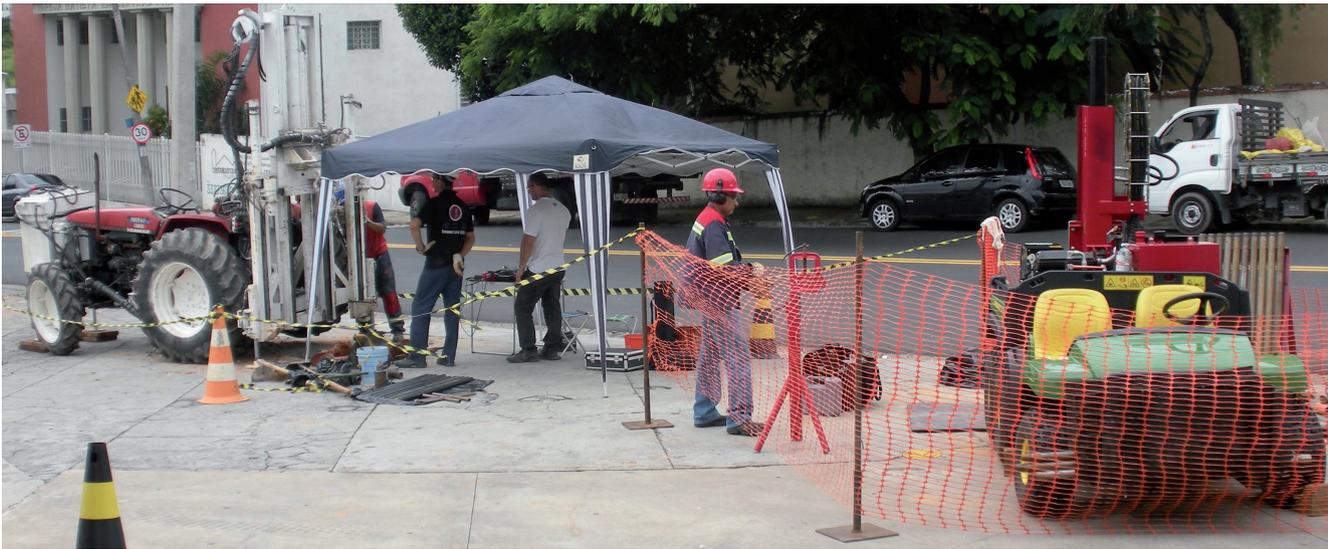


Figura 7 – Equipes trabalhando em uma abordagem semelhante à Tríade, com investigação de alta resolução com tomada de decisão em campo.

Partiu-se de um relatório de investigação detalhada tradicional, seguindo os procedimentos da CETESB, mas que não estabelecia claramente o MCS hidrogeológico e deixava muitas incertezas para se efetuar o projeto de remediação. O posto passou por uma investigação confirmatória e uma investigação detalhada empregando métodos tradicionais, que constataram uma contaminação por benzeno em fase dissolvida. O solo foi descrito como argiloso e homogêneo, com o nível de água em torno de 7,50-8,50 m de profundidade. O presente estudo teve o objetivo de identificar as

heterogeneidades hidrogeológicas e as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento para subsidiar um projeto de remediação que será proposta para a área. Além desse objetivo determinado no início dos trabalhos, durante a execução deles, optou-se por tentar elaborar um mapa de distribuição de condutividades hidráulicas, pois se percebeu, durante a execução dos ensaios RCPTu, que o perfil, embora predominantemente argiloso, não era homogêneo, possuindo zonas preferências de fluxo, conforme pode ser observado na Figura 8.

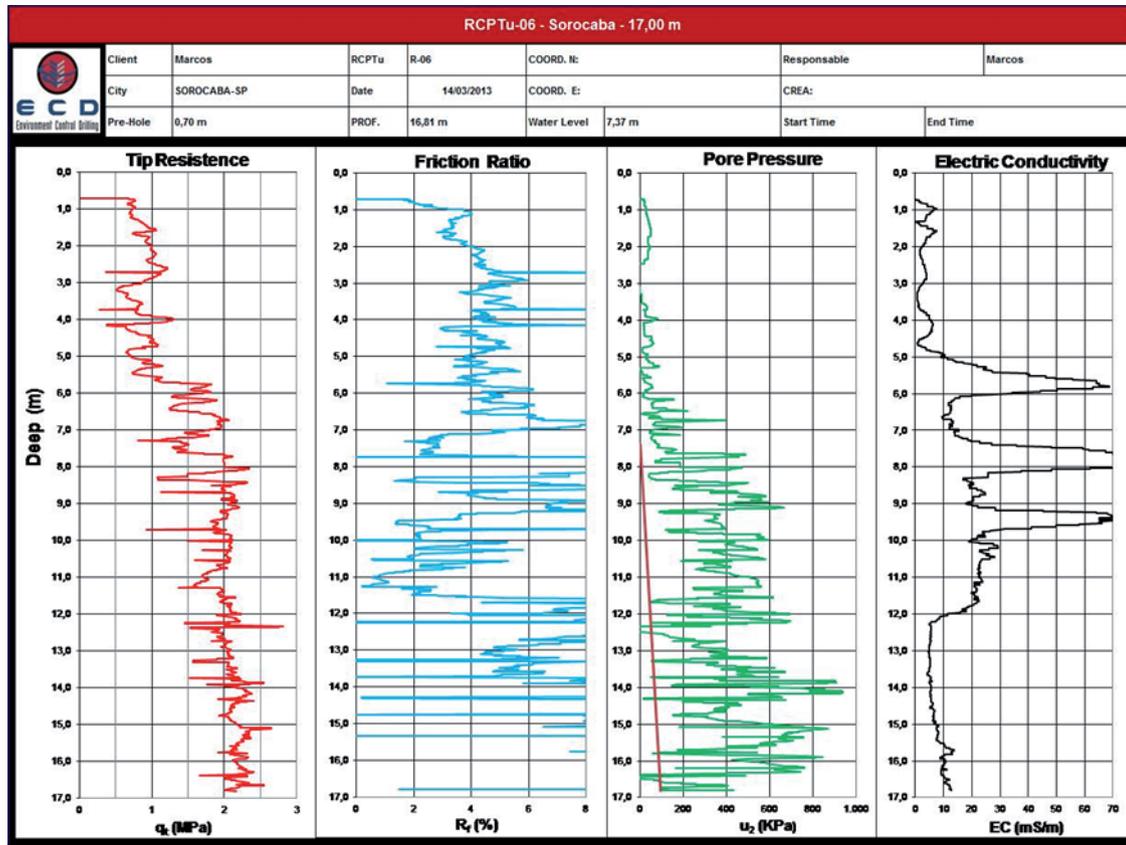


Figura 8 – Log de um dos ensaios RCPTu realizado na área onde está o posto de combustíveis

Foram realizadas amostragens de solo em 10 pontos empregando a técnica *Piston Sampler*, 10 ensaios RCPTu e 35 ensaios de dissipação de excesso de poro pressão em 5 dias de trabalho, que possibilitaram elaborar um Modelo Conceitual Hidrogeológico sólido, com as heterogeneidades do meio físico devidamente mapeadas e o mapa de condutividades hidráulicas construído com poucas incertezas, maximizando a eficiência do futuro projeto de remediação.

Observa-se uma grande variação na resistência de ponta (q_t), razão de atrito (R_f) e poro pressão (u_2), porém, ao longo de praticamente todo perfil há um excesso de poro pressão. Entretanto, em dois níveis (em torno de 11,5 m e em torno de 16,5 m de profundidade), os valores de poro pressão caem ao mesmo tempo que se tem um pico em q_t , indicando uma pequena, porém, consistente,

zona de fluxo, que provavelmente condiciona o fluxo advectivo de água subterrânea e contribui decisivamente para o aumento do fluxo de massa e para a migração do benzeno em fase dissolvida para receptores de fora da área.

Ensaio de dissipação de excesso de poro pressões (PPDT) foram realizados concomitantemente aos ensaios RCPTu. Nessa área havia um grande excesso de poro pressão gerado durante a cravação do piezocone, o que permitiu a realização de muitos ensaios PPDT em cada local onde os ensaios RCPTu foram executados e, conseqüentemente, gerou-se um grande volume de dados de K que permitiu elaborar um correlação entre o log (K) a poro pressão medida. A correlação obtida foi muito boa ($R^2=0,7651$ – Figura 9), o que permitiu a elaborar um perfil de K para cada local investigado.

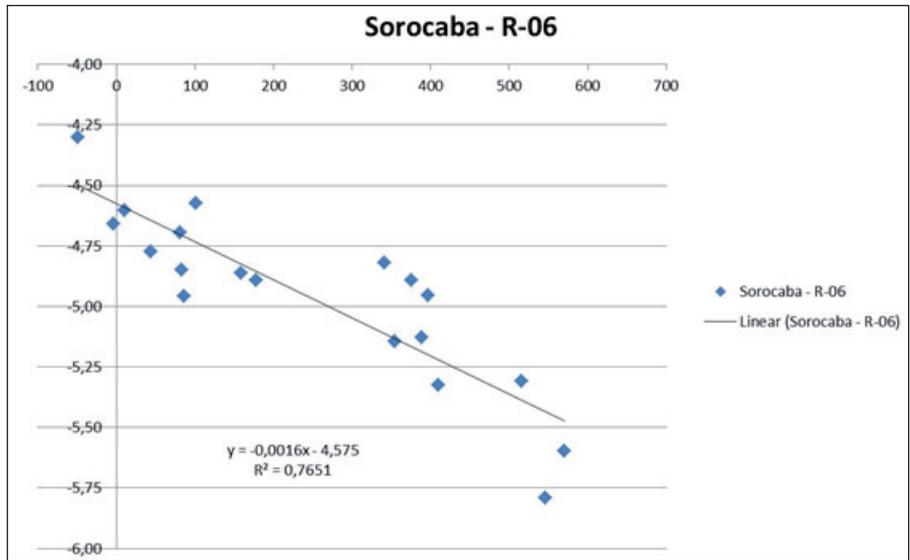


Figura 9 - Relação entre log (K) e poro pressão

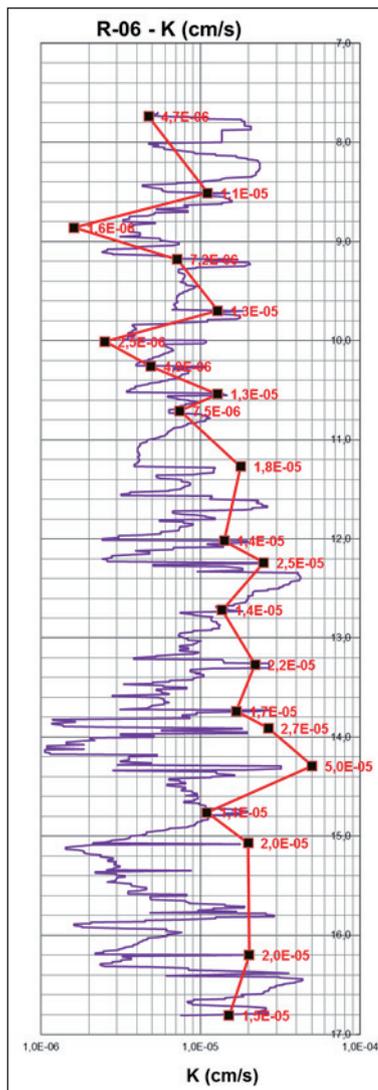


Figura 10 - Perfil de K no ponto de investigação 6 para a área onde se encontra um posto de combustíveis em Sorocaba-SP

O MCS elaborado a partir dessas informações redirecionou o projeto de remediação, que agora levará em conta a variação de K e as heterogeneidades existentes na área. O perfil de K com a profundidade para um dos pontos investigados pode ser observado na Figura 10.

Em ambos os casos estudados, a investigação geoambiental com tomada de decisão em campo, especialmente com o uso de ferramentas de HRSC, detectou as heterogeneidades hidrogeológicas e, com isso, possibilitou um entendimento mais adequado do meio físico, que é a base para a elaboração de um MCS sólido. Essa abordagem permitiu uma economia significativa de recursos, pois economizou tempo, refinou a investigação durante os trabalhos evitando remobilizações, diminuiu os custos totais do projeto, possibilitou a instalação de poços de monitoramento melhor posicionados e permitiu a elaboração de um projeto de remediação mais adequado às condições de cada área.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o objetivo definido no início desse trabalho, os resultados apresentados, em linhas gerais, permitem destacar o seguinte:

- Os resultados dos ensaios RCPTu possibilitam um maior nível de detalhamento que aqueles obtidos a partir de métodos tradicionais de investigação do subsolo quando

se pretende elaborar o modelo conceitual da área. As camadas hidroestratigráficas são detectadas com precisão de centímetros, o que não ocorre quando se tem apenas amostragens de solo obtidas pela técnica *Direct Push*

- O sensor de condutividade elétrica do solo complementa muito bem os resultados de resistência de ponta, o atrito lateral e a poro pressão medidos durante um ensaio RCPTu. Desta forma, pode-se dizer que esse ensaio fornece maior quantidade de dados que o ensaio de cone elétrico (CPT), e possibilita um melhor detalhamento do perfil que qualquer outro instrumento tradicional de coleta de dados hidroestratigráficos.
- A investigação apresenta um melhor resultado quando a tomada de decisão ocorre em tempo real, no próprio campo, com os dados obtidos em alta resolução.
- Com os ensaios RCPTu é possível elaborar um perfil hidroestratigráfico de alta resolução e detectar as zonas preferenciais de fluxo e armazenamento. Se acompanhado da coleta pontual de amostras de água subterrânea, o fluxo de massa pode ser calculado.
- A instalação de poços de monitoramento, embora seja considerada, no Brasil, a melhor metodologia para se realizar um estudo hidrogeológico, deve ser precedida de uma elaboração de um MCS com a maior resolução e maior detalhamento possível. Caso esse modelo prévio não exista, e a única informação do meio seja a própria sondagem para a instalação do poço, as incertezas associadas ao processo de instalação e à região onde esse poço está efetivamente monitorando, são tão grandes que podem inviabilizar qualquer tomada de decisão adequada.
- O RCPTu é uma técnica muito útil para elaboração de um MCS adequado, especialmente em uma abordagem que prioriza a coleta de grande densidade de dados, com alta resolução, para tomada de decisão em tempo real. Mesmo em uma abordagem tradicional, o ensaio RCPTu tem se mostrado uma alternativa mais eficaz e mais rápida para se obter informações hidroestratigráficas, quando comparado com as técnicas tradicionais empregadas na investigação geoambiental.

REFERÊNCIAS

AQUINO NETO, V. "Roteiro para Execução de Investigação Detalhada e Plano de Intervenção em Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis". Apresentação no Curso de Capacitação para Técnicos das Agências Ambientais do Programa PIA promovido pela Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo. Nov/2009.

CLEARLY, R. "Por que a maioria dos sistemas de remediação falha?" In: Anais do I Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo (CIMAS). São Paulo-SP. 2009

KILLENBECK, E. "Depositional Systems: Why is Geology Important". In: Anais da North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Mar/2012

KRAM, M.; DALZELL, T.D.; LJUNGGREN, P.; "Use of the High Resolution Piezocone for Geoenvironmental Applications". In: Anais do 2nd Internacional Symposium of Cone Penetration Test - CPT'10. Paper 3.06. Huntington Beach, CA. Mar/2010.

McCALL, G.W. "Applications of Geoprobe HPT Logging System for Geo-Environmental Investigations". Geoprobe Technical Bulletin MK 3184. Fev/2011.

NICHOLS, E. M. (2004), In a State of (Mass) Flux. Groundwater Monitoring & Remediation, 24: 4-6. doi: 10.1111/j.1745-6592.2004.tb01287.x. 2004.

PITKIN, S.; EDWARDS, T.; TURLEY, L.; RAWNSLEY, C.; "Reduction of Thermal Treatment Volume through the Application of High-Resolution Site Characterization at a Superfund Site" In: Anais da Ninth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Monterey, CA. Mai/2014

QUINNAN, J. "Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization - Part 1: Philosophy and Background". In: Anais da North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Mar/2012

QUINNAN, J; WELTY, N; KILLENBECK, E.; "Hydrostratigraphic and permeability profiling for

- groundwater remediation projects*". In: Anais do 2nd Internacional Symposium of Cone Penetration Test – CPT'10. Paper 3.33. Huntington Beach, CA. Mar/2010.
- RIYIS, M. T. *"Investigação Geoambiental com Tomada de Decisão em Campo Utilizando o RCPTu como Ferramenta de Alta Resolução"*. Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da FEB/UNESP. Bauru-SP. 2012.
- RIYIS, M. T.; GIACHETTI, H.L. ; DERRITE, R.M.; RIYIS, M. T. *"The use of the resistivity piezocone as a high resolution site characterization tool in Brazil"* In: Anais do 3rd Internacional Symposium of Cone Penetration Test – CPT'14. Paper 3-45. Las Vegas, NV. Mai/2014.
- SINGER, M; FIACCO, J. *"Abordagem Triade: Você Consegue Viver sem Ela?"* In: Anais do VII Seminário Internacional Sobre Revitalização de Áreas Contaminadas. Instituto Ekos. São Paulo. Out/2010.
- SCHULMEISTER, M.K.; BUTLER JR, J.J.; HEALEY, J. M.; ZHENG, L; WISOCKY, D. A.; McCALL, G. W. *"Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization"*. Ground Water Monitoring & Remediation 23, no 3: 52-62. 2003.
- VIENKEN, T; LEVEN, C.; DIETRICH, P. 2006. *"Use of CPT and other direct push methods for (hydro-) stratigraphic aquifer characterization – a field study"*. Canadian Geotechnical Journal, Volume 49, Number 2, February 2012 , pp. 197-206
- WELTY, N. *"Permeability Mapping: Strategies and Methods"*. In: Proceedings of North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Mar/2012

