

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUÍS GUSTAVO FAVA D'AGOSTINO

**Análise Comportamental Sensorial de Equipamentos Geofísicos e de Alta
Resolução: Alteração Temporal dos Padrões de Sinais**

SÃO PAULO
2020

LUÍS GUSTAVO FAVA D'AGOSTINO

**Análise Comportamental Sensorial de Equipamentos Geofísicos e de Alta
Resolução: Alteração Temporal dos Padrões de Sinais**

Versão Final

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Especialista em Gestão de Áreas
Contaminadas, Desenvolvimento Urbano
Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador(a): MSc. Sasha Tom Hart

SÃO PAULO
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

D'Agostino, Luís Gustavo Fava

Análise Comportamental Sensorial de Equipamentos Geofísicos e de Alta Resolução: alteração temporal dos padrões de sinais / L. G. F. D'Agostino -- São Paulo, 2021.

38 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Áreas Contaminadas [Monitoramento] 2. Contaminação do Solo [Caracterização] 3. Geofísica 4. Ferramentas de Alta Resolução 5. Variação Temporal de Contaminantes I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

À empresa Fugro, pelo apoio financeiro para realização e conclusão desta especialização e ainda por gentilmente ter cedido grande parte dos dados que embasaram os estudos apresentados nesta monografia.

Ao Prof. Sasha, por compreender que este momento atual afetou diretamente todo o desenvolvimento deste trabalho e me apoiar nas decisões tomadas.

RESUMO

D'AGOSTINO, Luís Gustavo Fava. Análise comportamental sensorial de equipamentos geofísicos e de alta resolução: alteração temporal dos padrões de sinais, 2020. 38 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Esta monografia apresenta um resumo das principais ferramentas não destrutivas utilizadas com principal foco de identificação e caracterização de plumas de contaminantes, bem como o seu comportamento e variação ao longo tempo. Quando analisados os comportamentos sensoriais para compostos, variações são observadas em relação a compostos orgânicos, voláteis ou não, devido principalmente aos processos de biodegradação que são responsáveis pela alteração nas suas estruturas químicas. Desta maneira, produtos puros ou inalterados são marcados por uma resposta específica dos sensores, resposta que não se repete quando o composto estudado se encontra exposto por longos períodos ao ambiente. Técnicas geofísicas possibilitam a caracterização de uma pluma, mas seu entendimento dependerá do conhecimento acerca das variações químicas que ocorreram na cadeia de decaimento do produto (como exemplo de elementos que podem variar seu comportamento de eletricamente condutivo a resistivo a depender da fase que se encontram no processo de degradação). Em contrapartida, alguns contaminantes mais estáveis podem apresentar como principal variação a sua movimentação e diluição no meio, onde a mudança do padrão acontece não em relação ao tipo de resposta física, mas sim na sua intensidade, estando muito mais relacionado com a caracterização geológica da área do que com alterações químicas. Três casos reais são apresentados como objeto de análise deste trabalho: a variação da eletrorresistividade para uma área contaminada por derivado de petróleo, estudo de uma área contaminada por óleo térmico com uso de UVOST e o uso do MIP na investigação de contaminante em solo de comportamento não drenante. As conclusões finais apresentam um ponto de atenção que deve ser de suma importância para o planejamento e a seleção da ferramenta a ser utilizada nas investigações: variações temporais.

Palavras-chave: Áreas contaminadas [monitoramento]. Contaminação do solo [caracterização]. Geofísica. Ferramentas de alta resolução. Variação temporal de contaminates.

ABSTRACT

D'AGOSTINO, Luís Gustavo Fava. Sensory behavioral analysis of geophysical equipment and screening tools: temporal variation of signal patterns, 2020. 38 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

This monograph presents a summary of the main non-destructive tools used with the focus of identification and characterization of contaminant plumes, as well as their behavior and variation over time. When analyzing the sensory behaviors for compounds, variations are observed in relation to organic compounds, volatile or not, mainly due to the biodegradation processes that are responsible for altering their chemical structures. In this way, pure or unaltered products are marked by a specific response from the sensors, a response that is not repeated when the studied compound is exposed for long periods to the environment. Geophysical techniques allow the characterization of a plume, but their understanding will depend on knowledge about the chemical variations that occurred in the product's decay chain (as an example of elements that can vary their behavior from electrically conductive to resistive depending on the phase they are in the degradation process). On the other hand, some more stable contaminants can present as the main variation their movement and dilution in the environment, where the change in the pattern happens not in relation to the type of physical response, but in its intensity, being much more related to the geological characterization of the area than with chemical changes. Three real cases are presented as the object of analysis of this work: the variation of the resistivity for an area contaminated by petroleum derivative, study of an area contaminated by thermal oil using UVOST and the use of MIP in the investigation of contaminant in soil behavior non-draining. The final conclusions present a point of attention that should be of paramount importance for the planning and selection of the tool to be used in the investigations: temporal variations.

Keywords: Contaminated areas [monitoring]. Site contamination [characterization]. Geophysics. Screening tools. Temporal variation of contaminants.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
3. PRINCIPAIS FERRAMENTAS GEOFÍSICAS NA INVESTIGAÇÃO INDIRETA.....	12
4. FERRAMENTAS DE ALTA RESOLUÇÃO (SCREENING TOOLS) NO MAPEAMENTO DE CONTAMINANTES	15
4.1. FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR ILUMINAÇÃO ULTRA-VIOLETA	15
4.2. SONDA DE INTERFACE DE MEMBRANA (<i>MEMBRANE INTERFACE PROBE</i>) ..	17
5. ANÁLISE COMPORTAMENTAL SENSORIAL	21
5.1. APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA DETECÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR ORGANOCLORADOS.....	21
5.1.1. Histórico da área.....	22
5.1.2. Resultados dos ensaios de MIP.....	22
5.1.3. Resultados da geofísica	24
5.2. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA UVOST PARA DETECÇÃO DE ÓLEO TÉRMICO NA REGIÃO DE GUARULHOS / SP	26
5.2.1. Histórico da área.....	27
5.2.2. Análises preliminares dos contaminantes	27
5.2.3. Resultados dos ensaios de campo.....	29
5.3. MAPEAMENTO DE CONTAMINAÇÃO POR PCE/TCE EM FÁBRICA QUÍMICA DE GUARULHOS / SP	31
5.3.1. Informações da área e do projeto em execução	31
5.3.2. Resultados dos ensaios de campo.....	32
6. CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do princípio de funcionamento do sistema UVOST/ROST-CPT.....	16
Figura 2 – Formas de onda conhecidas para alguns contaminantes recorrentes.....	17
Figura 3 – Resposta (callout) do emissor de referência de luz ultravioleta com associação de cores às 4 frequências luminosas: 350nm (azul), 400nm (verde), 450nm (laranja) e 500nm (vermelho).....	17
Figura 4 – Esquema do princípio de funcionamento do sistema MIP-CPT.	18
Figura 5 – Resultado da sonda MIP para área de existência de fase livre de PCE/TCE	23
Figura 6 – distribuição da contaminação em planta mapeada através do sistema MIP.....	23
Figura 7 – Planta de localização das linhas de eletrorresistividade.....	24
Figura 8 – Tomografia elétrica para a linha L-03.	24
Figura 9 – comparativo entre os resultados MIP-01 e eletrorresistividade	25
Figura 10 – comparativo entre os resultados MIP-39 e eletrorresistividade.....	26
Figura 11 – Resultado formas de onda (waveforms) para as amostras testes dos contaminantes. Canto superior esquerdo – resultado da amostra de 2014; canto superior direito – resultado da amostra de óleo puro; imagens inferiores – referentes às amostras dos poços de monitoramento.....	28
Figura 12 – formas de onda para os ensaios de campo. Imagens superiores – formas de onda compatíveis com os resultados das amostras de poço. Imagens inferiores – formas de onda incompatíveis com todos os testes de amostras.....	30
Figura 13 – imagem do levantamento MIP-CPTu com resultados considerados expressivos para a área.	33
Figura 14 – imagem do levantamento MIP-CPTu com indicativo dos valores que foram considerados como discretos para a análise da área.	33
Figura 15 – imagem do levantamento MIP-CPTu com indicativo dos spikes de ativação dos sensores em 2 dos 3 canais de leitura.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação dos métodos geofísicos de superfície na investigação de solo e água subterrânea para contaminantes e fontes de contaminação.....	13
Tabela 2 – Sensibilidade dos detectores MIP para o grupo CHC e BTEX-Aromáticos	19

1. INTRODUÇÃO

Ao tratar-se das necessidades do monitoramento dos contaminantes, tornam-se cada vez mais difundidos os usos de ferramentas de alta resolução e geofísicas. Elas auxiliam na localização, delimitação espacial das plumas, cubagem, direcionamento do fluxo, estimativas da concentração e modelamento do comportamento da pluma. Porém, um dos aspectos que notadamente não tem recebido sua devida atenção no mercado nacional é a resposta dos sensores às alterações químicas e físicas dos componentes do contaminante ao longo do tempo.

O avanço na legislação ambiental propõe para os padrões nacionais um incremento significativo nos estudos de campo, seja na investigação confirmatória, investigação detalhada ou até no monitoramento para encerramento (conforme indica a Decisão da Diretoria nº 038/2017/C da CETESB).

Dentro da indústria, nota-se que a velocidade com que surgem as necessidades, sejam por responsabilidades socioambientais sejam por obrigações financeiras legais, exigem um planejamento e gerenciamento de áreas contaminadas em tempos limitados, onde os prazos de execução e análise de dados são cruciais para apresentação de resultados que atendam às expectativas de todos os *stakeholders* do projeto. A despeito da velocidade da necessidade de apresentação dos resultados, a análise do processo de degradação e distribuição do contaminante é um fato que necessita de cuidado no planejamento dado que estes processos podem alterar as propriedades físico-químicas dos contaminantes e influenciam diretamente tanto na escolha da tecnologia a ser utilizada quanto nos resultados esperados.

Moreira, Dourado e Braga (2006) mostram em seu artigo “Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo” que existe uma contradição entre os valores geoelétricos observados, sendo observadas anomalias de alta e de baixa resistividade para os derivados de petróleo numa mesma área. Moreira, Braga e Fries (2009) descrevem que “a correlação temporal entre pH e Eh pode indicar as condições geoquímicas predominantes, que governam a solubilidade ou precipitação de íons e, consequentemente, o padrão de resistividade elétrica” no estudo de um lixão com a presença de chorume. Pankow e Cherry¹ (1996,

¹ PANKOW, JF e CHERRY, JA. 1996. Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater. Waterloo Press, Portland, 522p.

apud SCIULLI, 2008, p. 50) indicam que a atenuação natural do percloroetileno ocorre por decloração redutiva, onde intui-se que sensores baseados na leitura de organoclorados podem perder sensibilidade. Assim, mostra-se a necessidade de estudos acerca das alterações químicas e qual sua influência na variação temporal dos sensores, bem como a taxa de dispersão do contaminante dentro do meio.

Para a elaboração deste trabalho considerou-se que o desenvolvimento tecnológico utilizado nos estudos *in situ* dos contaminantes é relativamente recente. Não foi identificada uma bibliografia compilatória que traga uma relação de técnicas e características que possam ser utilizadas amplamente para qualquer caso e/ou substância química de interesse. Os casos apresentados neste trabalho foram baseados na observação de estudos e projetos realizados ao longo dos últimos 10 anos pela empresa Fugro, além de apresentação de alguns casos de divulgação pública e aplicação de novas tecnologias em desenvolvimento.

Seguindo o contrato de confidencialidade, não serão informados os locais e nem os clientes aos quais pertencem estes dados, ficando a análise restrita às expectativas de resultados para as tecnologias confrontada com as respostas efetivamente obtidas.

2. OBJETIVOS

A análise temporal de variação dos sensores, conforme variação do comportamento químico, objetiva verificar a eficiência das tecnologias aplicadas nos estudos de caso, dado que cada ferramenta é voltada para análise de uma característica específica.

Três casos serão apresentados e analisados:

- Teste do ensaio de eletrorresistividade em área contaminada por TCE/PCE em conjunto com ensaios de MIP;
- A utilização de sistema de fluorescência induzida no estudo de uma área contaminada por óleo térmico, com resultados para diversas amostras de água obtidas em poços e análises *in situ*;
- Avaliação do mapeamento da contaminação por PCE/TCE com uso de sonda de interface membranosa associada ao ensaio de cone em uma empresa química do município de Guarulhos/SP.

3. PRINCIPAIS FERRAMENTAS GEOFÍSICAS NA INVESTIGAÇÃO INDIRETA

Como citado anteriormente, a DD-38/2017 aprofunda os procedimentos investigativos para áreas contaminadas, tanto no monitoramento das áreas com potencial de contaminação, sob suspeita de contaminação ou já com contaminação confirmada. Este documento indica o uso de ferramentas que possam auxiliar no mapeamento de contaminações de subsuperfície e aprofundar o entendimento geológico/geotécnico das áreas em estudo.

Especificamente, quando tratado da investigação indireta, os métodos geofísicos são empregados de maneira tanto a facilitar a caracterização da área quanto na identificação da contaminação, e devem sempre ser associados a investigações diretas tais como sondagens, amostragens e análises químicas.

Mondelli (2008) apresenta uma relação das metodologias e técnicas geofísicas de maior aplicação na investigação geoambiental, assim como possíveis aplicações para os métodos em diferentes etapas das atividades de campo no GGAC (IPT, 2014, p. 59-61).

Cada metodologia geofísica estuda uma propriedade física específica da subsuperfície (densidade das rochas, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica etc.) e os resultados dependem da existência de um contraste de valores desta propriedade, objeto de estudo, e o meio ao seu redor – meio encaixante. Esta relação implica em duas condições para a seleção do método a ser utilizado: (1) o contaminante deve responder fisicamente ao método selecionado e (2) a resposta da área contaminada deve ser diferente da resposta da área não contaminada em tal ordem de grandeza que seja suficiente para gerar contraste.

O entendimento da primeira condição, com suas implicações, é intuitivo: um método que não tem a capacidade de leitura das propriedades físicas do contaminante é inadequado no uso para identificação deste contaminante. Com isso, faz-se necessário entender quais são as características físico-químicas do componente, não apenas no seu estado puro, mas na sua reação com o meio encaixante e considerando-se o tempo no qual este elemento encontra-se exposto, decaindo e sendo alterado para garantir que as propriedades físicas da sua cadeia de decaimento e subprodutos da degradação também respondam de maneira adequada ao método geofísico aplicado.

As implicações da segunda condição mostram-se mais complexas pois exigem um conhecimento mais detalhado das propriedades físicas do solo, distribuição espacial do contaminante (tanto lateralmente como em profundidade) e concentrações reais. A diferença das propriedades físicas do solo com o contaminante é o que irá gerar o contraste que permite a identificação deste. Sua distribuição espacial irá determinar os parâmetros da metodologia (arranjo) e se haverá resolução suficiente para modelamento adequado. E, por fim, sua concentração real é o que irá garantir que a resposta gerada possua ordem de grandeza suficiente para se destacar do ruído de fundo.

Kearey, Brooks e Hill (2002) dividem os métodos de aquisição em 4 grupos principais: sísmicos, gravitacionais, magnéticos e elétricos, sendo este último subdividido em resistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, eletromagnético e radar. A norma NBR 15935:2011 determina que, no estudo de contaminantes e fontes de contaminação, os principais métodos aplicados são os elétricos, com possibilidade extremamente restrita do uso da gravimetria (apenas para o caso de estudo de limites de valas, lixões e aterros).

Tabela 1 – Aplicação dos métodos geofísicos de superfície na investigação de solo e água subterrânea para contaminantes e fontes de contaminação.

Aplicação	Método					
	ER	SP	EM	GPR	MiG	IP
Vazamento em área de barragens e bacias de contenção	B	A	B	B		
Limites de valas, lixões e aterros	A		A	A	B	B
Intrusão salina	A		A	A		B
Salinização do solo	A		A			B
Delimitação de zonas com LNAPL	B			A		B
Delimitação de zonas com DNAPL	B		B	A		
Delimitação de zonas com contaminantes inorgânicos e lixívia de aterros	A	B	A	B		B

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011, adaptado)

A – Método de primeira escolha B – Método de segunda escolha

ER – Eletroresistividade SP – Potencial espontâneo EM – Eletromagnético GPR – Radar de penetração em solo MiG – Microgravimetria IP – Polarização induzida

Kearey, Brooks e Hill explicam em partes como acontecem os processos de condução da corrente elétrica dentro de um sistema fraturado, onde “(...) a maior parte das rochas conduz a eletricidade por processos eletrolíticos mais que por processos eletrônicos” (p. 316). No que se refere a áreas contaminadas, por tanto, a condutividade elétrica também estará diretamente relacionada à solubilidade do contaminante, assim como sua capacidade de geração de eletrólitos tanto via dissolução quanto através dos processos de biodegradação. Segundo Cassidy² et al. (2001, apud MOREIRA, DOURADO e BRAGA, 2006, p. 384) condições aeróbicas e anaeróbicas na biodegradação laboratorial de LNAPL sugerem a possibilidade de drástica redução dos valores de resistividade do aquífero.

² CASSIDY DP, WERKEMA DD Jr., SAUCK W, ATEKWANA E, ROSSBACH S & DURIS J. 2001. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 6(1), p. 47–52.

4. FERRAMENTAS DE ALTA RESOLUÇÃO (SCREENING TOOLS) NO MAPEAMENTO DE CONTAMINANTES

As ferramentas de alta resolução (*screening tools*) têm ao longo dos últimos anos passado por um grande avanço tecnológico, onde ferramentas como MIP (*membrane interface probe*) e LIF (*light induced fluorescence*) vêm se tornando vitais nas etapas de investigação e durante o processo de reabilitação de áreas contaminadas para verificação da eficácia da remediação. Tais ferramentas podem ser acopladas ao sistema de cone e outros módulos para obtenção de parâmetros físicos, como o sistema HPT (*hydraulic profile tool*). Os instrumentos de alta resolução trazem as informações momentâneas das condições do solo e, assim como os métodos geofísicos, seus resultados dependem das condições atuais do contaminante (concentração, tempo de exposição ao ambiente etc.).

Como qualquer tecnologia, estas ferramentas possuem limites de detecção, onde os limites inferiores são os de maior interesse pois no geral são superiores aos parâmetros estabelecidos pelos órgãos ambientais para intervenção.

4.1. FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR ILUMINAÇÃO ULTRA-VIOLETA

As ferramentas utilizadas para indução de fluorescência de determinados contaminantes são conhecidas pela sigla LIF (*light induced fluorescence*), na qual pode se encaixar um dos módulos do CPT conhecido como UVOST (*ultra violet optical screening tool*) – Figura 1.

A ferramenta UVOST é utilizada como um detector *in situ* de contaminações derivadas de hidrocarbonetos no solo e água subterrânea.

Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH) reagem quando são submetidos a excitação por determinados comprimentos de onda. Essa excitação leva à emissão de luz em um determinado intervalo de comprimento de onda (fluorescência). Como os PAH's são encontrados em todos os tipos de óleos (mesmo que, por vezes, em proporções muito pequenas), o sistema UVOST pode detectar contaminações causadas por óleo derivado de hidrocarbonetos, tais como, combustível de aviação, diesel, gasolina, óleo cru, alcatrão, creosoto etc.

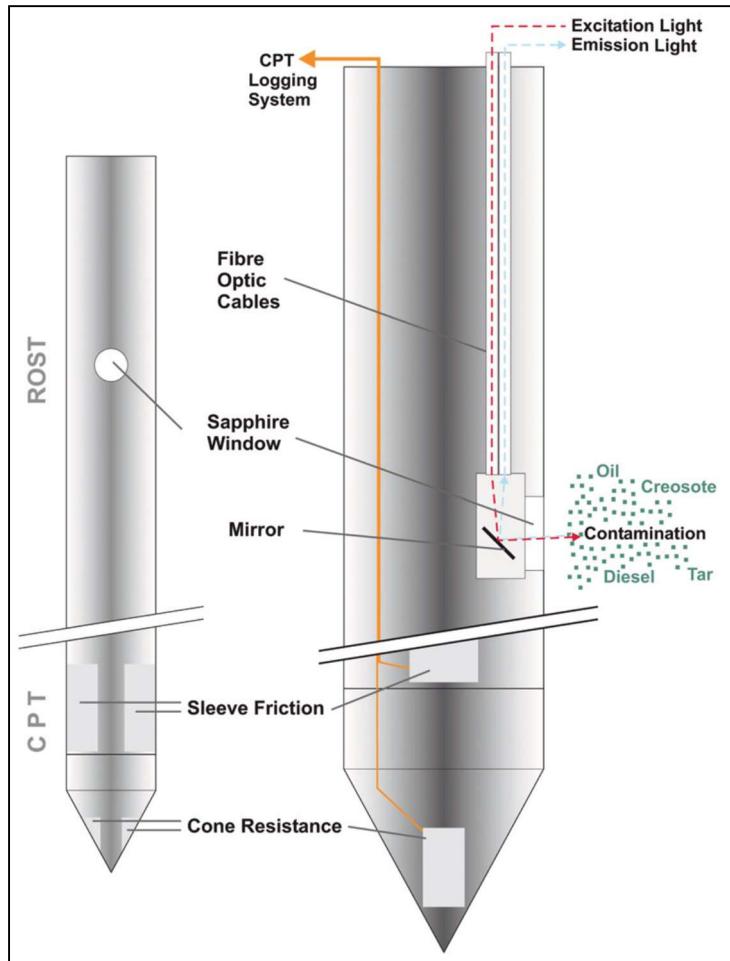


Figura 1 – Esquema do princípio de funcionamento do sistema UVOST/ROST-CPT

Fonte: Arquivo da FUGRO Consult GmbH

A intensidade da fluorescência total do sistema UVOST é dada pela soma de quatro comprimentos de onda específicos: 350nm, 400nm, 450nm e 500nm (Figura 2). Isso equivale dizer que cada “janela” ou “canal” de comprimento de onda possuirá certa intensidade dependendo de qual componente do óleo é excitado. Em outras palavras, cada sinal de fluorescência contém um espectro de quatro comprimentos de onda, permitindo assim a identificação de produtos graças às formas de onda (*waveforms*) características. A principal diferença entre os padrões de onda convencionais e do sistema UVOST é a associação de cores a cada uma das 4 frequências de interesse (Figura 3).

As misturas de hidrocarbonetos leves, como gasolina, querosene ou diesel, nas quais predominam comprimentos de onda menores (350nm e 400nm), e os hidrocarbonetos mais pesados, tais como alcatrão ou creosoto, para comprimentos de onda maiores (450nm e 500nm), podem ser visualizada pela “mudança no

comprimento de onda e alteração no padrão de cores”, mostrando se uma dada forma de onda foi mudada para a esquerda (fração de óleo leve) ou para a direita (fração de óleo pesado).

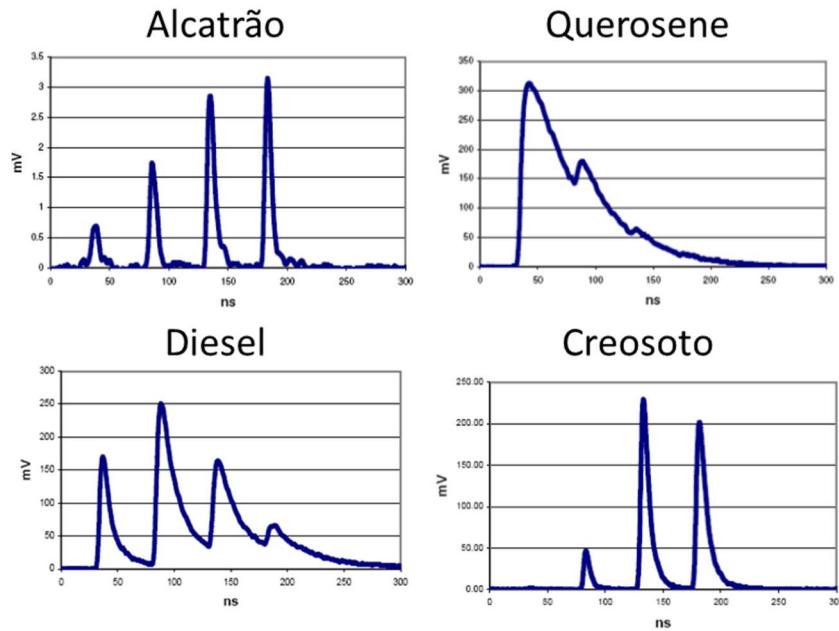


Figura 2 – Formas de onda conhecidas para alguns contaminantes recorrentes.
Fonte: Dakota Technologies, Inc.

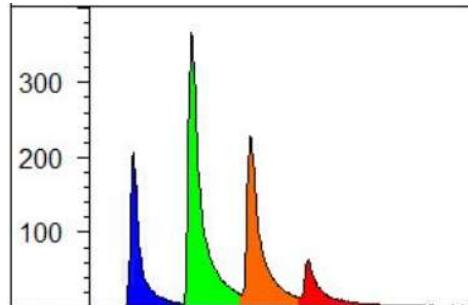


Figura 3 – Resposta (callout) do emissor de referência de luz ultravioleta com associação de cores às 4 frequências luminosas: 350nm (azul), 400nm (verde), 450nm (laranja) e 500nm (vermelho).

4.2. SONDA DE INTERFACE DE MEMBRANA (*MEMBRANE INTERFACE PROBE*)

Utilizada para identificar a presença de hidrocarbonetos clorados (CHC) e outros compostos orgânicos voláteis (VOC), a tecnologia MIP tem a capacidade de detectar VOC's, como por exemplo, o Tetracloroeteno ou Percloroetileno (PCE), Tricloroeteno

(TCE), e compostos como os hidrocarbonetos aromáticos - Benzeno, Tolueno, Etileno, Xileno (BTEX), dentre outros, tanto nas zonas saturadas quanto nas insaturadas.

A área da membrana do módulo é mantida aquecida a uma temperatura superior ao ponto de ebulição da solução de maior interesse, onde esse procedimento permite que as substâncias realizem o processo de termoadsorção e, por difusão, atravessem a membrana. As substâncias são enviadas através de uma corrente de gás que percorre tubos específicos (capilares) até a superfície, onde os dados são detectados e armazenados.

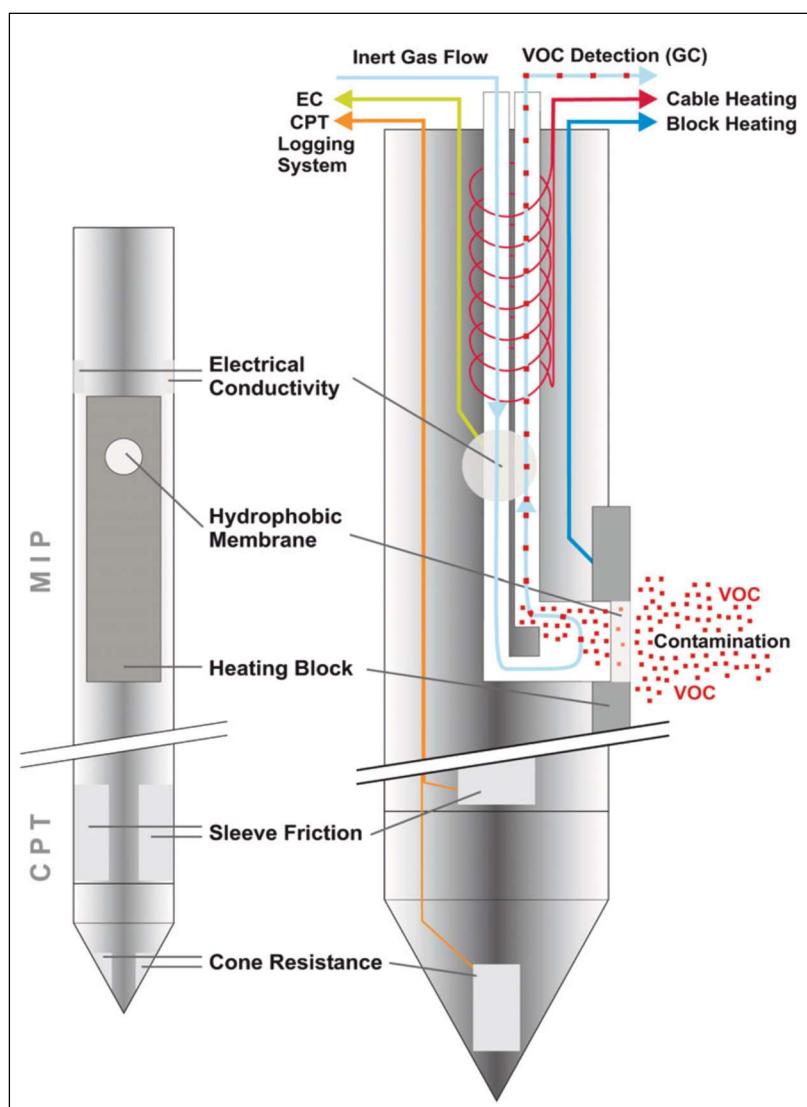


Figura 4 – Esquema do princípio de funcionamento do sistema MIP-CPT.
Fonte: Arquivo da FUGRO Consult GmbH

A detecção das substâncias acontece por meio de um cromatógrafo equipado com diferentes detectores: detector de ionização de chama (*Flame Ionisation Detector*

- FID), detector de fotoionização (*Photo Ionisation Detector* - PID) e um detector de condutividade eletrolítica seca (*Dry Electrolytic Conductivity Detector* - DELCD) ou detector de captura de elétrons (*Electron Capture Detector* - ECD) onde cada um será responsável pela medição de um dado grupo de contaminantes.

A sensibilidade do MIP depende de vários fatores que, ademais das condições do equipamento, são resultantes das propriedades físicas e químicas dos compostos, assim como da permeabilidade do meio.

Em média, a magnitude dos limites padrões na detecção de alguns compostos em águas subterrâneas é de 300 ppb para o PCE, 200 ppb para o TCE, 400 ppb para o DCE, 500 ppb para VC, 400 ppb para o Benzeno, 300 ppb para o Tolueno e 200 ppb para o Xileno (Geoprobe, 2020). Esses valores podem variar conforme as características da área investigada.

Na Tabela 2, pode-se visualizar a sensibilidade dos detectores PID, FID e DELCD para algumas das mais comuns substâncias.

Tabela 2 – Sensibilidade dos detectores MIP para o grupo CHC e BTEX-Aromáticos

Composto	Detector PID	Detector FID	Detector DELCD
PCE	++	+	+++
TCE	+++	+	+++
cDCE	++	+	++
tDCE	++	+	++
VC	+	+	+
TCA	-	+	+++
Benzeno	++	++	-
Tolueno	+++	+++	-
Etilbenzeno	++	++	-
Xileno	+++	+++	-

PCE: Tetracloroeteno TCE: Tricloroeteno cDCE: cis-1,2-Dicloroeteno

tDCE: trans-1,2-Dicloroeteno VC: Monocloroeteno (Cloreto de Vinila) TCA: Tricloroetano

Sensibilidade +++ = boa Sensibilidade ++ = média Sensibilidade + = baixa

Sensibilidade: - = sem medida Sensibilidade: -/+ = medida apenas em altas concentrações.

Fonte: arquivo Fugro.

Estas características de sensibilidade dos sensores são referentes aos produtos puros, o que implica que, quanto mais tempo estes compostos tenham passado expostos à agente degradantes, maior será a alteração na resposta esperada.

De acordo com as informações apresentadas na tabela acima, nota-se que as informações são apresentadas na sequência da decomposição do percloroetileno. Observa-se também um comportamento sequencial do detector DELCD: sua sensibilidade ao composto diminui conforme o processo de degradação por decloração avança. Conforme documentação técnica Geoprobe, esta mudança no comportamento dos sensores para elementos da mesma cadeia é explicada através da diminuição do número de átomos na molécula e das alterações na estrutura molecular.

5. ANÁLISE COMPORTAMENTAL SENSORIAL

Os dados da análise do comportamento sensorial serão baseados nas informações obtidas por um grupo de projetos executados pela empresa Fugro. Devido ao caráter confidencial das informações, nenhum dado que possa identificar a área ou o cliente poderá ser fornecido.

Ao longo dos últimos anos, a experiência com projetos dentro da área ambiental tem mostrado que os resultados esperados baseados em informações históricas e, em alguns casos, até informações de poço podem apresentar divergências com os resultados obtidos pelas ferramentas geofísicas e de alta resolução e carecem de estudos mais aprofundados para identificação de suas reais causas. Na sequência, serão discutidos alguns dos casos reais.

Para todos os casos analisados, foi confirmado que todos os equipamentos se encontram calibrados, que os testes de funcionamento foram realizados de maneira adequada e os levantamentos aconteceram por pessoas devidamente treinadas, eliminando-se qualquer possibilidade de erro por defeito mecânico ou manuseio incorreto dos equipamentos.

5.1. APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS NA DETECÇÃO DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO POR ORGANOCLORADOS

Projeto realizado na região de Osasco, SP, iniciou-se através de uma campanha de ensaios de MIP-CPT para detecção de pluma de contaminação por PCE/TCE já conhecida. Estes ensaios tiveram como principal objetivo o mapeamento detalhado das plumas de contaminante numa área já em fase de remediação. Em conjunto com os ensaios de alta resolução, foram realizadas na área 4 linhas de levantamento por eletrorresistividade com utilização da técnica da tomografia elétrica, arranjo dipolo-dipolo e dipolos iniciais de 2,5 m com o intuito de testar a resposta dos contaminantes organoclorados para os métodos elétricos.

Diversos casos experimentados em projetos realizados pela empresa Fugro apresentaram uma correlação entre a existência de fase livre de TCE com uma diminuição significativa na condutividade elétrica medida pela sonda MIP, principalmente para solos arenosos. Desta maneira, esperava-se que o mesmo padrão fosse observado pela geofísica de superfície.

5.1.1. Histórico da área

Localizada nas remediações da cidade de São Paulo, esta antiga fábrica química possuía em um de seus galpões uma oficina para limpeza de peças e maquinários com o uso de PCE durante as décadas de 1970 e 1980.

Após desativação da unidade e sua transferência para a região do ABC paulista, o terreno foi vendido para uma empresa de logística de materiais com funcionamento até hoje. Toda a região onde se encontra o empreendimento é considerada área industrial.

Apesar da sua topografia relativamente plana, o terreno da fábrica era cortado por um pequeno córrego que sofreu influência pelo passivo ambiental deixado pela empresa anterior.

Campanhas de investigação realizadas no final dos anos 2000 indicaram a presença de contaminantes em subsuperfície, principalmente nas proximidades da oficina de limpeza, e contaminação do córrego. Após esta evidenciação deu-se início ao processo de remediação da área.

A campanha de investigação executada pela Fugro em 2016 teve como principal objetivo verificar a situação da área após cerca de 2 anos de início da remediação local.

5.1.2. Resultados dos ensaios de MIP

Executada em uma malha densa de pontos (cerca de 100 verticais de ensaios de MIP-CPT), detectou-se que ainda existiam extensas áreas de ativação do sensor DELCD (principal sensor para detecção de compostos organoclorados).

Seus valores foram considerados extremamente altos, superando a escala de medição do equipamento que é limitada a 5 V.

Baseado nas informações obtidas através dos ensaios executados, amostras de solo e de água foram coletados principalmente nas zonas de maior ativação dos sensores, confirmando a existência de contaminantes ainda em fase livre no local, evidenciando plumas de contaminantes em zonas não identificadas anteriormente.

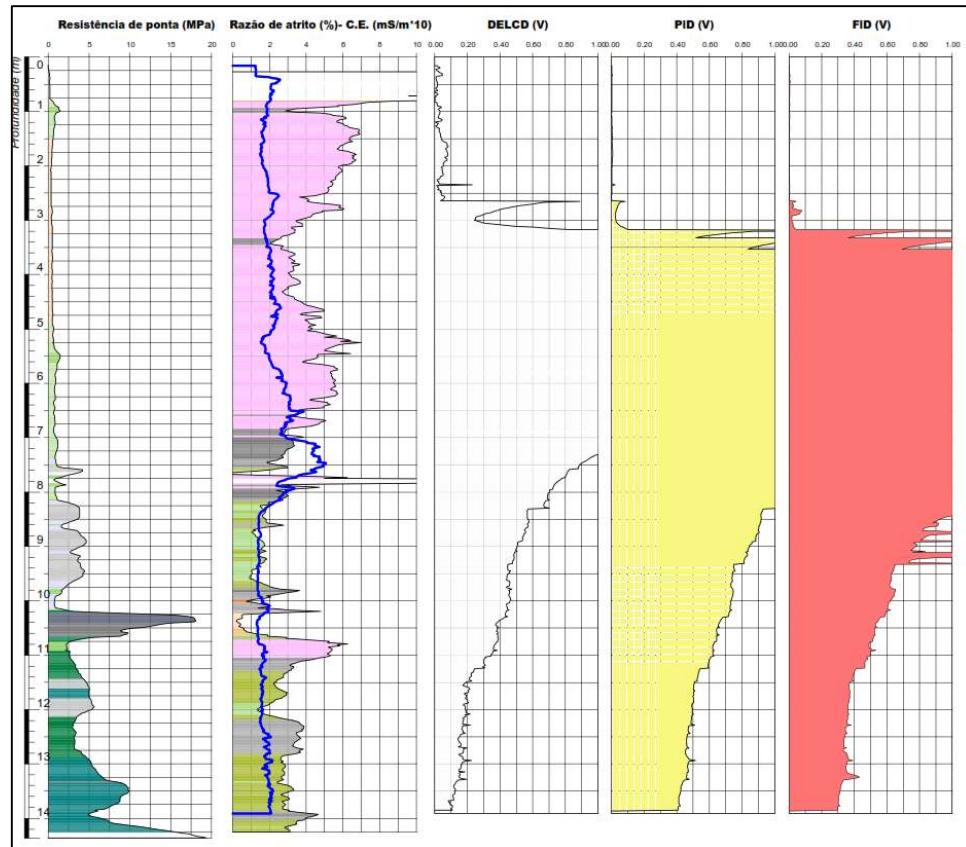


Figura 5 – Resultado da sonda MIP para área de existência de fase livre de PCE/TCE

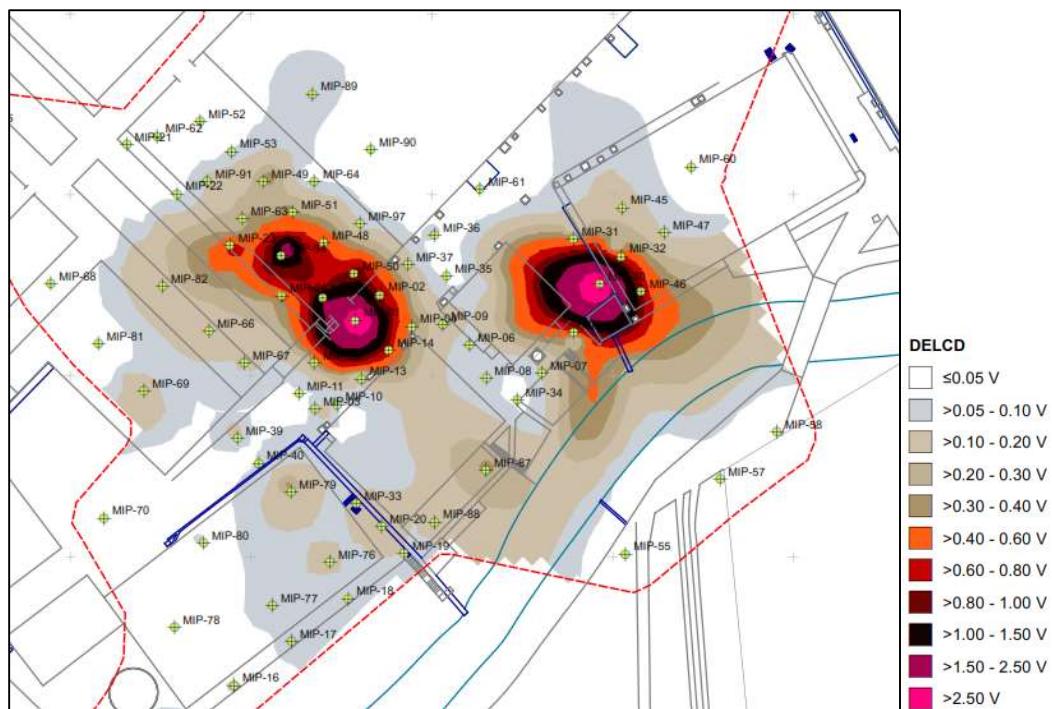


Figura 6 – distribuição da contaminação em planta mapeada através do sistema MIP.

As áreas escolhidas para levantamento das linhas de geofísica foram baseadas nos resultados apresentados pelos ensaios de MIP.

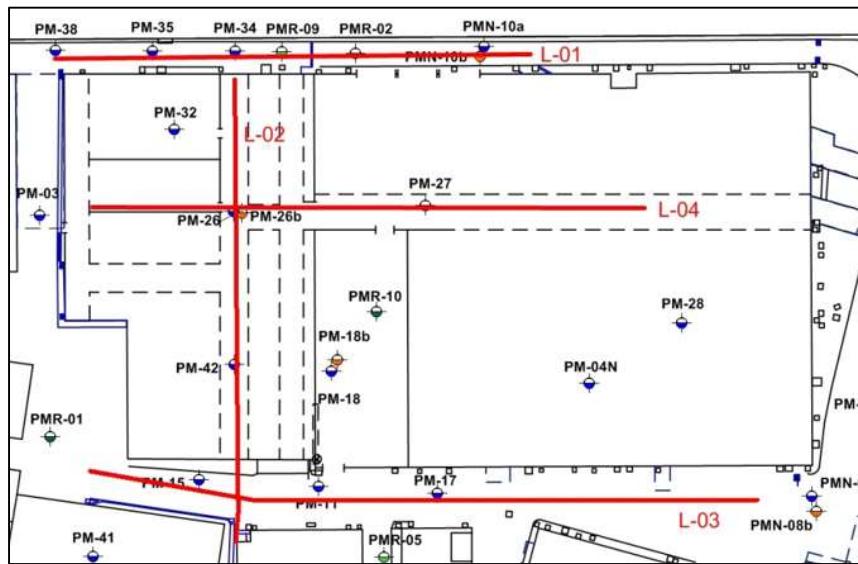


Figura 7 – Planta de localização das linhas de eletrorresistividade

5.1.3. Resultados da geofísica

A linha L-03 foi posicionada ao longo de 9 pontos de execução dos ensaios de CPT-MIP e seu resultado é apresentado abaixo:

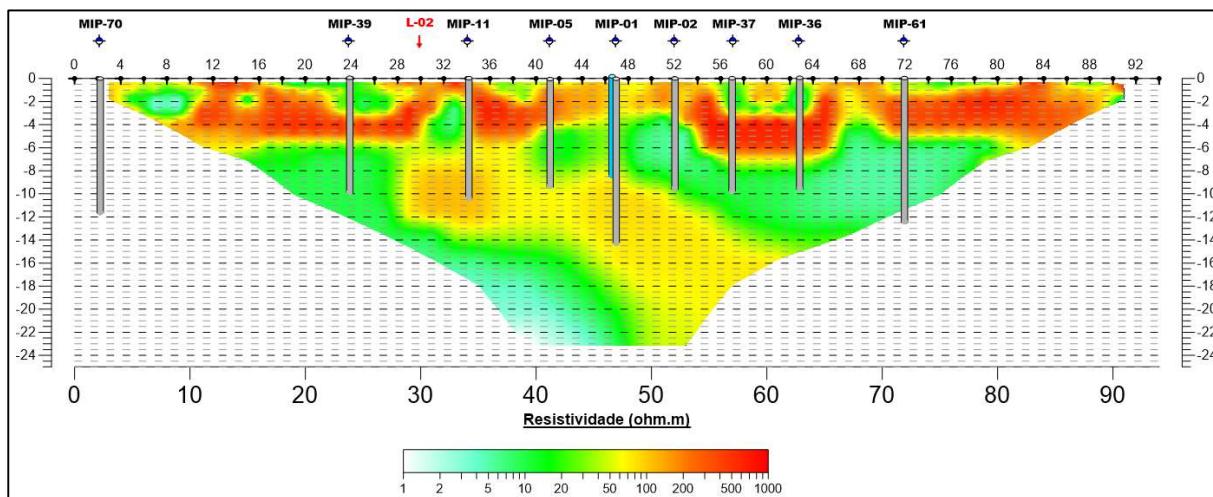


Figura 8 – Tomografia elétrica para a linha L-03.

Seus resultados no geral apresentaram valores extremamente baixos (abaixo de 50 Ohm.m) que é considerado um valor associado geralmente à presença de contaminantes com comportamento químico semelhante ao chorume (ELIS, 2005).

Outros autores, como Brooks e Reynolds, também fazem menção a valores muito baixos, considerando que suas causas geralmente não são naturais.

Quando estes valores são comparados aos resultados do ensaio MIP-01 (Figura 5), é possível verificar pelo ensaio de MIP a ocorrência de uma contaminação a partir de 3,0 m de profundidade, porém, devido à circulação dos contaminantes no sistema de leitura, sua determinação em profundidade não é bem definida (o decaimento exponencial da contaminação no log de resultados indica que a contaminação da camada de fase livre permanecia circulando no sistema). Nesta mesma posição, entre 4 e 8 metros de profundidade, o ensaio de eletrorresistividade indicava valores de baixíssima resistividade.

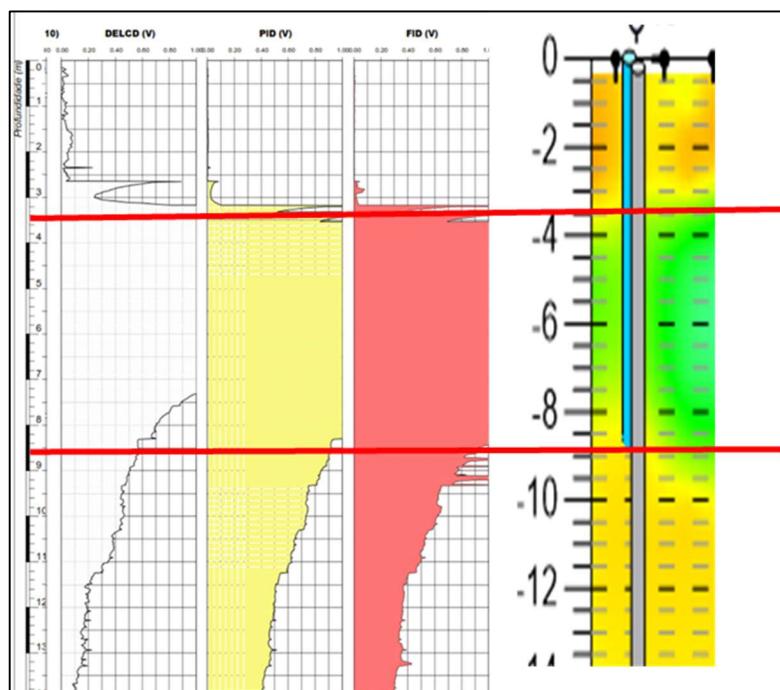


Figura 9 – comparativo entre os resultados MIP-01 e eletrorresistividade

Para esta mesma linha, comparou-se os resultados obtidos pelo MIP-39, localizado no início da linha, com os resultados obtidos pela linha de geofísica. Para que a correlação se provasse, resultados semelhantes deveriam ser observados no comparativo entre as metodologias, porém, esta relação não foi observada.

Na região onde se localiza o ponto MIP-39, a eletrorresistividade indicou novamente valores baixíssimos de resistividade elétrica abaixo de 6 metros de profundidade, porém, o ensaio MIP nesta posição não indicou quantidade significativa de contaminantes (conforme Figura 10).

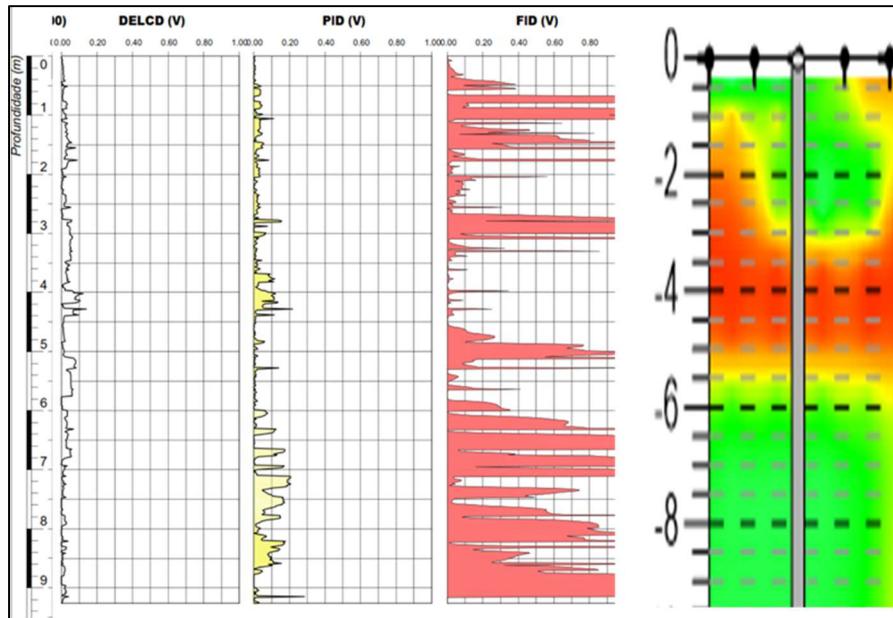


Figura 10 – comparativo entre os resultados MIP-39 e eletrorresistividade

O mesmo resultado de não-correlação foi observado em diversos outros pontos do estudo, de maneira que, o mais provável, é que os resultados de resistividade (sejam valores baixos ou altos) não são resultado da contaminação por organoclorado.

Em uma troca de e-mails e conversas telefônicas com a equipe de especialistas da Fugro GmbH da Alemanha em junho de 2016, a equipe alemã confirmou que testes realizados por eles indicaram que não havia correlação entre os resultados de eletrorresistividade e a contaminação por organoclorados. Suas possíveis causas estão no fato que as cadeias de organoclorados, mesmo quando diluídas em água, não liberam eletrólitos para alteração dos padrões eletrorresistivos do solo local.

Ainda assim, maiores testes em áreas com processos avançados de biodegradação dos compostos da cadeia do PCE necessitam ser feitos para que se confirme que mesmo os subprodutos gerados ao longo da decomposição bacteriana não geram alterações nos padrões químico-físicos de áreas degradadas.

5.2. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA UVOST PARA DETECÇÃO DE ÓLEO TÉRMICO NA REGIÃO DE GUARULHOS / SP

O projeto realizado na região de Guarulhos, em São Paulo, teve por premissa a detecção de óleo térmico *Downtherm A* utilizado no processo da fábrica para

resfriamento de alguns equipamentos da linha de produção. O sistema requisitado para execução deste mapeamento foi o UVOST (*ultraviolet optical screening tool*) acoplado ao cone de penetração para obtenção dos parâmetros geotécnicos do terreno de maneira a auxiliar no mapeamento da pluma. A área já possuía alguns poços de monitoramento instalados, além de uma bomba para extração da fase livre identificada em campanhas anteriores.

De acordo com as informações do fabricante (Dow), o óleo *Downtherm A* é descrito como sendo um óleo biodegradável (não foi encontrada nenhuma informação a respeito da meia vida do produto na época) possuindo densidade específica de 1.055,7 kg/m³ a 25°C.

Outro aspecto a ser comentado é que, em mistura com a água, o óleo térmico comprovou-se como um DNAPL, sendo que, após 5 minutos de decantação, era possível observar que uma fina película oleosa ainda permanecia em suspensão na mistura.

5.2.1. Histórico da área

As informações recebidas do cliente indicavam que, dado a idade da fábrica e do processo, era do conhecimento que este produto era descartado em canaletas que levariam a um sistema coletor para posterior descarte. Acreditava-se que durante este trajeto o produto poderia ter migrado para o solo abaixo da indústria.

Através de campanhas de sondagens diretas, foram identificados locais de maior concentração do produto, onde foram instalados poços de monitoramento com bombas de extração de fase livre.

5.2.2. Análises preliminares dos contaminantes

A fim de determinar a aplicabilidade do método solicitado com o composto de interesse, algumas amostras foram enviadas pelo cliente para teste em ambiente controlado em agosto de 2014. As amostras consistiam em água obtida dos poços de inspeção acondicionadas em frascos de vidro. Não houve controle do condicionamento das amostras em nenhum momento desde sua coleta até entrega.

Após recebimento, em ambiente de baixa iluminação, a amostra foi testada para resposta de luminescência, apresentando resultados positivos, com maior intensidade

para as frequências de 350 nm e 400nm, enquanto as frequências de 450nm e 500nm apresentavam intensidade 3 a 6 vezes menor, mas ainda apresentando resposta para as 4 frequências (*callout* “AT1 – 2014” da Figura 11).

Após 1 ano de realização dos primeiros testes, foi realizada a campanha de investigação, que envolveu a coleta de novas amostras de água de alguns dos poços de monitoramento. Para que fosse estabelecido um padrão comparativo entre as amostras, foi realizado o teste de fluorescência para uma amostra do óleo térmico puro. Todos os resultados das formas de onda dos testes podem ser observados na Figura 11.

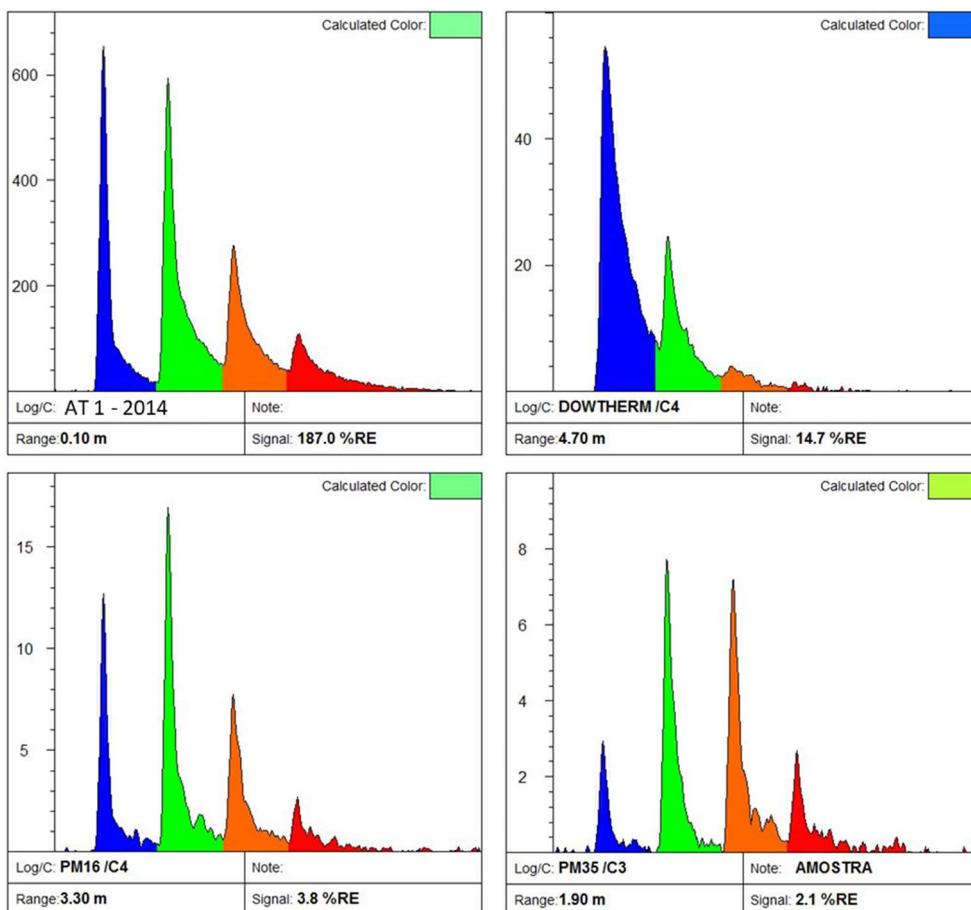


Figura 11 – Resultado formas de onda (waveforms) para as amostras testes dos contaminantes. Canto superior esquerdo – resultado da amostra de 2014; canto superior direito – resultado da amostra de óleo puro; imagens inferiores – referentes às amostras dos poços de monitoramento.

O óleo Dowtherm A puro apresentou intensa resposta luminescente para a frequência de 350nm e uma resposta mediana para frequência de 400nm, enquanto

que praticamente nenhuma resposta para as frequências de 450nm e 500nm foi observada.

Quando analisadas as amostras obtidas através dos poços de monitoramento, diferentemente das amostras anteriores, estas apresentaram maior intensidade na frequência de 400nm, chegando a apresentar forte resposta para a frequência de 450nm (resposta que não foi observada nem pelo óleo térmico e nem pela amostra de 2014).

Um dos principais aspectos observados no comparativo entre as amostras é que praticamente não houve congruência entre os testes das amostras (amostra de 2014, amostras de 2015 e do óleo puro).

5.2.3. Resultados dos ensaios de campo

Após a realização de todos os testes procedeu-se para as análises de campo com o sistema UVOST acoplado a um cone de CPT. Os testes foram executados em diversos pontos dentro da área, alguns mais próximos ou mais afastados dos poços de monitoramento, além da execução de alguns pontos realizados fora da área da fábrica, a fim de se comparar com os resultados externos também.

Dentre os testes que apresentaram resposta positiva para luminescência, foram isoladas as *waveforms* de alguns dos principais pontos, possibilitando a comparação com os demais ensaios realizados antes do início das atividades de campo em imagens denominadas *callouts*.

Para os resultados apresentados na Figura 12, apenas o padrão de onda da imagem do canto superior esquerdo era correspondente a um dos testes realizados dentro das instalações. Demais imagens são de padrões de ondas de anomalias encontradas em pontos de sondagem fora das instalações da fábrica.

Os resultados dos ensaios *in situ* mostraram que nem todos os pontos de ensaio onde houve resposta positiva para o sensor possuíam correspondência com os testes das amostras.

Observou-se que o *callout* 1 apresentou compatibilidade com a amostra PM35/C3, onde as principais respostas eram picos isolados para as 4 frequências, sendo a maior intensidade nas frequências de 400nm e 450nm, enquanto que o *callout* 2 apresentava semelhança com os resultados do poço PM16/C4 com a principal resposta para as frequências de 400nm (primária) e 350nm (secundária).

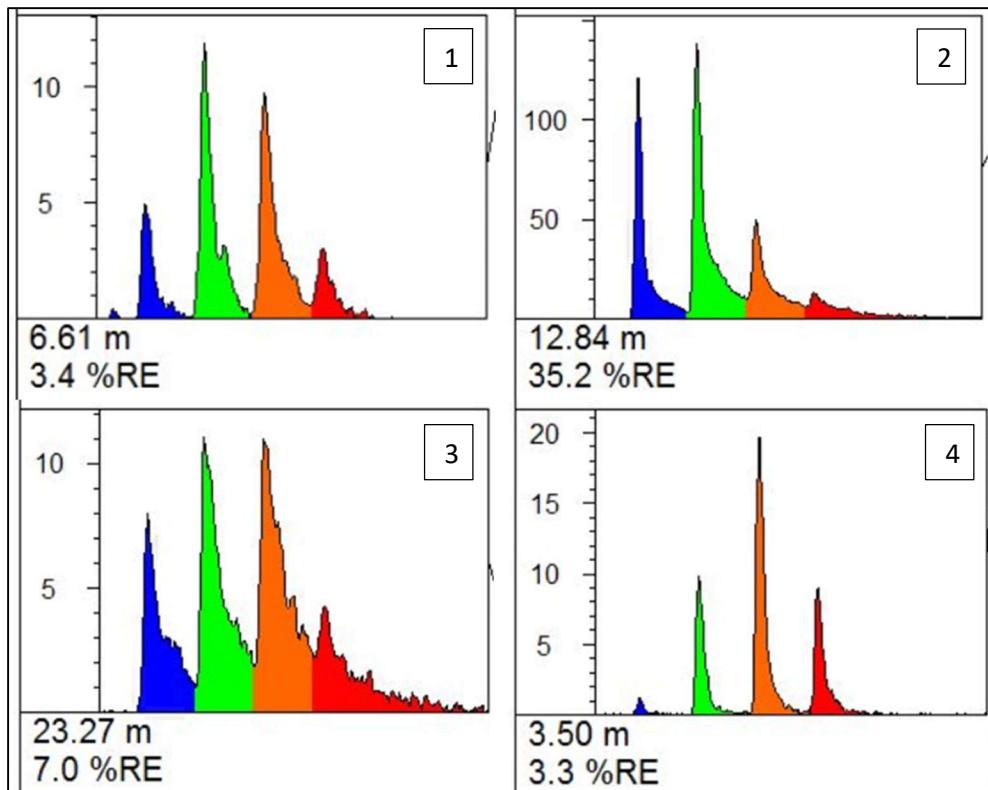


Figura 12 – formas de onda para os ensaios de campo. Imagens superiores – formas de onda compatíveis com os resultados das amostras de poço. Imagens inferiores – formas de onda incompatíveis com todos os testes de amostras.

Para o *callout* 3, a resposta, ainda que possuindo semelhança na amplitude das frequências com o teste PM16, seus picos não são isolados e o decaimento da intensidade com o aumento da frequência acontece de maneira mais gradual (enquanto os demais ensaios apresentavam rápido decaimento com o aumento da frequência).

O último exemplo mostrado no *callout* 4 traz a maior intensidade para a frequência de 450mn, onde o ensaio não apresenta nenhuma compatibilidade com os demais, apresentando uma resposta extremamente baixa para a frequência de 350nm.

Quando observados e comparados todos os resultados, algumas considerações podem ser feitas:

- Tomando por premissa verdadeira que as amostras de água fornecidas pelo cliente continham o óleo informado, a não compatibilização dos resultados do óleo puro com as amostras pode ter pelo menos duas explicações: (1) o uso do óleo em sua função como óleo térmico altera suas propriedades e; (2) após mais de 20 anos exposto ao ambiente, os

processos de biodegradação foram os responsáveis pela modificação dos padrões observados;

- Dado que o óleo é descrito como biodegradável e o acondicionamento da amostra de 2014 não foi controlado, infere-se a possibilidade de degradação da amostra entre a coleta e data do teste de maneira diferente à ocorrida dentro dos poços, o que explicaria a incompatibilização dos resultados entre as amostras fornecidas;
- A diferença entre os resultados apresentados nas amostras de água e nos resultados dos ensaios *in situ* podem indicar haver mistura entre diferentes contaminantes;

Como possibilidade de solução para a interpretação da incongruência dos resultados, futuramente amostras de água e solo de todos os pontos deveriam ser coletadas para análise química específica.

5.3. MAPEAMENTO DE CONTAMINAÇÃO POR PCE/TCE EM FÁBRICA QUÍMICA DE GUARULHOS / SP

O projeto realizado na região de Guarulhos, em São Paulo, teve por premissa a detecção de pluma de contaminação por PCE/TCE utilizados nas caldeiras e para lavagem dos maquinários. O sistema aplicado na execução deste mapeamento foi o MIP (*membrane interface probe*) acoplado ao cone de penetração com leitura de poro-pressão para obtenção dos parâmetros geotécnicos do terreno de maneira a auxiliar no mapeamento da pluma. Os pontos de execução dos ensaios foram posicionados conforme resultados químicos obtidos através de amostras *beacons*.

5.3.1. Informações da área e do projeto em execução

A área pertencente a uma empresa química em funcionamento há mais de 20 anos havia detectado em campanhas ambientais anteriores a presença de contaminantes no solo similares aos produtos químicos utilizados em seu processo. Através de poços de monitoramento e amostragem por *beacons*, novos resultados apresentaram a presença dos contaminantes com foco principal na área de operação das caldeiras.

Desta maneira, para que a pluma do contaminante fosse mapeada em maior detalhe, foi solicitado o emprego da ferramenta MIP dentro das instalações da fábrica.

Para auxiliar na interpretação geotécnica do ambiente, o módulo MIP foi acoplado a uma ponteira CPTu para detalhamento das informações de comportamento do solo em termos de granulometria e drenabilidade. Como teste para a área e para que os resultados pudessem ser comparados com amostras físicas, 3 coletas tipo *direct push* foram realizadas ao lado do primeiro ponto de teste do MIP.

Os testes químicos da água dos poços e dos *beacons* apresentaram em diversos pontos resultados com concentrações de contaminante acima dos limites indicados pela CETESB para intervenção, porém, abaixo dos limites de detecção do equipamento.

5.3.2. Resultados dos ensaios de campo

Quase que na totalidade da área, os resultados apresentados pelos três sensores do MIP (FID, PID e DELCD) mostraram pouca ativação dos sensores e foram divididos em 3 grupos de resultados positivos: resultados expressivos, resultados discretos e resultados dispersos. A análise dos resultados desta área baseou-se em pequenas variações dos sensores (abaixo de 0.5V, em alguns casos necessitando que a análise fosse de valores inferiores a 0.1V), valores que para casos de grandes contaminações geralmente são considerados como ruído de fundo. As premissas utilizada para isso foram as informações fornecidas pelo cliente, onde os poços de monitoramento localizados na área indicavam na maioria contaminação da ordem de 0.3 a 0.5 ppm (valor este igual ao limite inferior de detecção do MIP).

Os resultados que foram considerados expressivos possuíam, ainda que em baixa amplitude, respostas claras da ativação dos sensores, com indicação nos 3 leitores (Figura 13).

Para o grupo dos resultados discretos, foram consideradas pequenas variações dos sensores, contínuas em profundidade e que poderiam não ser identificadas ou visualizadas nos três leitores. Em maior parte, estes resultados foram identificados em baixas profundidades e até mesmo superficiais (Figura 14).

Por fim, o grupo de valores considerados dispersos devido à sua característica de apresentar picos (*spikes*) de ativação dos sensores em profundidade variáveis e que também poderiam não ser identificados nos três leitores (Figura 15).

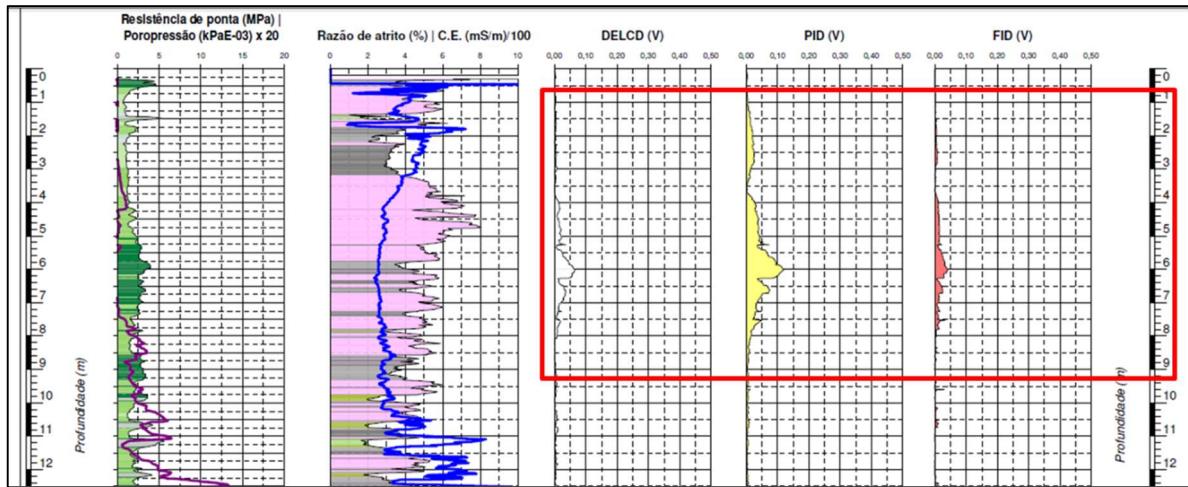


Figura 13 – imagem do levantamento MIP-CPTu com resultados considerados expressivos para a área.

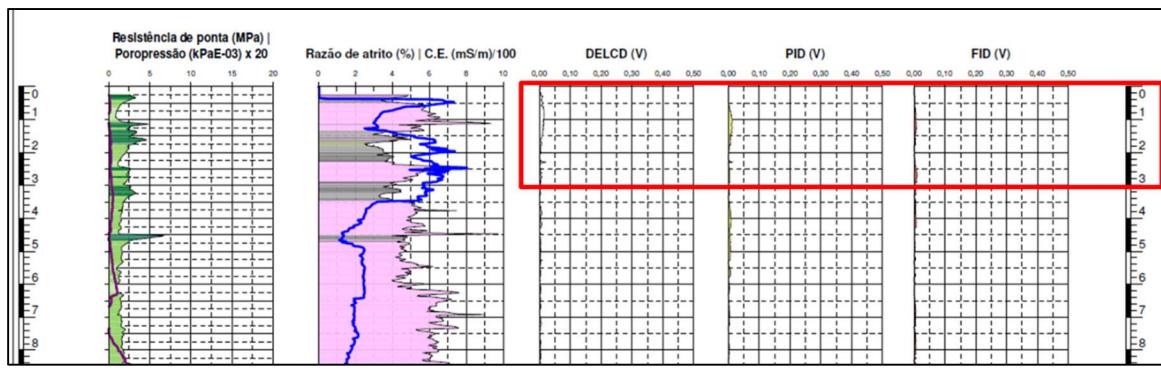


Figura 14 – imagem do levantamento MIP-CPTu com indicativo dos valores que foram considerados como discretos para a análise da área.



Figura 15 – imagem do levantamento MIP-CPTu com indicativo dos spikes de ativação dos sensores em 2 dos 3 canais de leitura.

Este terceiro grupo ainda apresentou como característica específica que os *spikes* dos sensores na grande maioria de sua ocorrência estavam relacionados aos picos apresentados pelo sensor de poro-pressão do cone.

Além dos resultados dos sensores, também foram analisadas as amostras de solo coletadas nas profundidades de 2,0 a 3,0 m (amostra 1), 10,0 a 11,0m (amostra 2) e 18,0 a 19,0 m (amostra 3) de profundidade e que foram descritos como argila siltosa para a amostra 1, silte arenoso com excesso de poro pressão para a amostra 2 e areia siltosa para a amostra 3.

Nos resultados das amostras de solo também foi possível observar outro fator relevante para a área: a camada da amostra 2, apesar de descrita como silte arenoso, apresentava pelo diagrama de classificação de solo de Robertson comportamento argiloso, isto é, comportava-se como uma camada não drenante. Tal fato pode ser comprovado pelas observações da amostra que levou aproximadamente 24h horas para que a água retida se depositasse no fundo do amostrador e o processo estabilizasse. Esta característica mostrou que o comportamento não drenante da área deveria ser considerado quando analisados os resultados do método.

Os módulos ambientais (MIP, UVOST, HPT etc.) geralmente são cravados no solo a uma velocidade constante de 2 cm por segundo. Esta velocidade no geral mostra-se adequada para a coleta de informações do MIP, respeitando-se as características operacionais em relação à sua temperatura de aquecimento.

Desta maneira, a análise conjunta de todas as informações obtidas permite que algumas considerações sejam feitas em relação à área e ao comportamento dos sensores:

- A área apresentava uma camada considerável de material de comportamento não drenante em subsuperfície com baixa permeabilidade;
- Apesar de parte dos *spikes* estarem relacionados com os picos do excesso de poro-pressão, alguns deles foram identificados como ocorrendo durante a paralisação da sonda em profundidade para estabilização da temperatura de aquecimento da membrana. Tais paralisações permitiam que uma maior quantidade do material se volatilizasse e assim ocasionassem picos de ativação dos sensores;
- A incongruência dos resultados de poço e das análises dos sensores no local podem ser associados à baixa permeabilidade do solo local. O

contaminante contido na camada não drenante poderia estar lentamente se deslocando em direção aos poços de monitoramento por gravidade, causando um acúmulo de contaminação dentro do poço, mas disseminado numa camada espessa de solo, e sendo impedido de retornar ao sistema.

6. CONCLUSÕES

Ao longo de todo este trabalho, foram discutidos diversos aspectos a respeito das metodologias não invasivas e de alta resolução que possuem influência direta e indireta no comportamento dos sensores das ferramentas utilizadas.

Dados que estas ferramentas se baseiam na análise do comportamento físico dos sensores, verifica-se que alterações físicas e/ou químicas possuem relações diretas com os padrões observados. Porém, sua relação depende da escolha da ferramenta adequada, ou seja, que poderá identificar alguma propriedade do contaminante.

Processos como a biodegradação de um dado componente irá interferir na sensibilidade dos sensores basicamente devido a duas condições:

- Ambientes aeróbicos e anaeróbicos influenciam diretamente nas propriedades elétricas do meio, onde a ocorrência das bactérias intensifica os processos eletrolíticos do meio aquoso;
- O processo da biodegradação altera a composição química do contaminante conforme o processo avança (exemplo da decloração da cadeia do percloroeteno) de maneira que a diminuição da quantidade de átomos na molécula dos contaminantes e das alterações na estrutura molecular ao longo do tempo são responsáveis pela modificação na sensibilidade de sensores para organocloradas.

Outro aspecto que se mostrou de grande importância para a análise temporal dos sensores são as condições físicas da subsuperfície. Seu comportamento drenante / não drenante poderá ser responsável pelas diferenças observadas entre as amostras coletadas e as análises *in situ*. Ferramentas de alta resolução podem efetuar as medições em um tempo superior à velocidade de percolação da solução contendo o contaminante, de maneira que a concentração efetiva do contaminante encontrada no meio poderá não ser identificada de maneira adequada. Em contrapartida, estes terrenos apresentariam uma tendência de acúmulo dos contaminantes nos poços de monitoramento ocorrendo entre as coletas de amostras.

Mostra-se de extrema importância o entendimento do comportamento físico-químico tanto do composto quanto do meio ao longo do tempo, assim como a sua interação, de maneira que o entendimento dos comportamentos locais permita que as ferramentas possam ser escolhidas conforme sua maior eficiência.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (22 de Abril de 2011). ABNT NBR 15935:2011. *Investigações ambientais - aplicação de métodos geofísicos*. São Paulo, São Paulo, Brasil: ABNT.
- Braga, A. C. (2007). Métodos geoelétricos aplicados nos estudos de captação e contaminação de águas subterrâneas. *Apostila interna do curso de Geologia (Departamento de Geologia)*. Rio Claro: IGC/UNESP.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB. (07 de Fevereiro de 2017). Decisão de Diretoria Nº 038/2017/C. *Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito d.* São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Dourado, J. C. (2010). Geofísica aplicada e suas áreas de atuação. *Notas de Aula*. Rio Claro, São Paulo, Brasil.
- Elis, V. R. (2005). A Geofísica como Ferramenta para Detectar e Mapear Contaminação. *Apostila interna do curso de Geofísica (Departamento de Geofísica)*. São Paulo: IA/USP.
- Fachin, S. J. (2012). *O sinal de potencial espontâneo em investigações ambientais: fatores que condicionam a amplitude de uma anomalia*. IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas , Departamento de Geofísica. São Paulo: IAG-USP.
- Gallas, J. D. (2005). O método do potencial espontâneo (SP) - uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2), 133-144.
- Geoprobe. (22 de Julho de 2020). *MIP Membrane interface probe*. Fonte: <https://geoprobe.com/mip-membrane-interface-probe>
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2014). *Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas*. (I. e. BNDES, Ed.) São Paulo, Brasil: São Paulo.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *Geofísica de Exploração*. (M. C. Coelho, Trad.) São Paulo: Oficina de Textos.

Mondelli, G. (03 de Outubro de 2008). *Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: EESC/USP.

Moreira, C. A., Braga, A. C., & Fries, M. (2009). Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica*, 283-293.

Moreira, C. A., Dourado, J. C., & Braga, A. C. (5 de Setembro de 2006). Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, pp. 383-392.

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). West Sussex: Wiley-Blackwell.

Sciulli, B. E. (2008). *Remediação do composto tetracloroeteno em subsuperfície através do processo de oxidação química in situ (ISCO)*. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo: IGc-USP.

Telford, W. M., Geldart, L., Sheriff, R., & Keys, D. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.