

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LEANDRO MONTEIRO DE FREITAS

**Investigação em alta resolução com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*:
uma revisão sistemática da literatura**

São Paulo
2022

LEANDRO MONTEIRO DE FREITAS

**Investigação em alta resolução com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*:
uma revisão sistemática da literatura**

Versão Original

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): Profa. Dra. Marilda Mendonça Guazzelli Ramos Vianna

São Paulo

2022

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.

Catálogo-na-publicação

Freitas, Leandro

Investigação em alta resolução com o uso de ferramentas de detecção direta por direct-push: uma revisão sistemática da literatura / L. Freitas -- São Paulo, 2022.

56 p.

Monografia (MBA em 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 2.Contaminação do solo 3.Águas Subterrâneas [investigação] I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todo o suporte que tem me dado ao longo dos anos.

Agradeço aos meus pais e irmã, que mesmo longe, sempre demonstraram apoio incondicional.

Agradeço aos mentores, aos professores e colegas de profissão, que tem sido uma constante fonte de inspiração e desenvolvimento profissional.

Agradeço aos professores e colegas de curso, que tive o privilégio de conhecer e tornaram essa caminhada mais agradável.

Agradeço a Profa. Marilda e tutora Gabriela Paupitz pelo valioso apoio e orientação durante a elaboração desta monografia.

RESUMO

FREITAS, Leandro Monteiro de. **Investigação em alta resolução com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*: uma revisão sistemática da literatura**, 2022. 56f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

As ferramentas de detecção direta (*direct sensing*) por *direct-push* (cravação contínua) são um dispositivo técnico para investigação de sites contaminados, em tempo real. Nos últimos anos, seu uso tem crescido significativamente para o refinamento de Modelo Conceitual do Site (CSM, do inglês *Conceptual Site Model*). Nesta monografia serão compiladas informações de artigos científicos e outras publicações, nacionais e internacionais, que discutem o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push* para a investigação de alta resolução em solo e água subterrânea. Essa revisão focou nas seguintes sondas de investigação de alta resolução (HRSC, do inglês *High Resolution Site Characterization*): *Membrane Interface Probe* (MIP); *Hydraulic Profiling Tool* (HPT); *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampling* (HPT-GWS); *Optical Image Profiler* (OIP). Foram selecionadas 27 publicações de 2011 até 2021, e os estudos mais frequentes são as aplicações do MIP e HPT, por serem técnicas mais consolidadas. Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que, com o uso das técnicas de HRSC, é possível obter um modelo conceitual mais preciso e representativo, utilizando uma ferramenta valiosa que permite desenvolver uma estratégia de remediação eficiente.

Palavras-chave: Áreas Contaminadas, Contaminação do solo, Águas Subterrâneas [investigação]

ABSTRACT

FREITAS, Leandro Monteiro de. **High resolution site characterization using direct-push direct sensing tools: a systematic literature review**, 2022. 56f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Direct sensing tools by direct push are technical devices for investigating contaminated sites in real time. In recent years, their use has grown significantly for the refinement of the Conceptual Site Model (CSM). In this work, information from scientific papers and other national and international publications, that discuss the use of direct sensing tools by direct push for high-resolution investigation in soil and groundwater were reviewed with a focus on the following High Resolution Site Characterization (HRSC) investigation probes: Membrane Interface Probe (MIP); Hydraulic Profiling Tool (HPT); Hydraulic Profiling Tool-Groundwater Sampling (HPT-GWS); and Optical Image Profiler (OIP). Twenty-seven publications from 2011 to 2021 were selected. MIP and HPT are the most consolidated techniques and were employed most frequently, as they are the most consolidated techniques. Based on the results presented, it can be stated that, with the use of HRSC techniques, it is possible to obtain a more accurate and representative conceptual model, using a valuable tool that allows the development of an efficient remediation strategy.

Keywords: Contaminated Sites, Soil Contamination, Groundwater [investigation]

LISTA DE SIGLAS

AC: Áreas Contaminadas

AIC: *Akaike's Information Criterion* (Critério de Informação de Akaike)

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CSM: *Conceptual Site Model* (Modelo Conceitual do Site)

CSIA: *Compound-specific stable isotope analysis* (análise de isótopos estáveis específicos do composto)

CVOC: *chlorinated volatile organic compound* (composto orgânico volátil clorado)

DNAPL: *Dense Non-Aqueous Phase liquid* (líquido de fase livre não aquosa denso)

EC: *Electrical conductivity* (condutividade elétrica)

ECD: *Electron capture detector* (detector de captura de elétrons)

EN: *Electronic Nose* (nariz eletrônico)

FID: *Flame ionization detector* (detector de ionização de chama)

HPT: *Hydraulic Profiling Tool* (ferramenta de perfilamento hidráulico)

HPT-GWS: *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampling* ((ferramenta de perfilamento hidráulico-amostragem de água subterrânea)

HRSC: *High Resolution Site Characterization* (investigação ambiental de alta resolução)

HRPP: *High-Resolution Passive Profiler* (perfilador passivo de alta resolução)

LDH: *Layered Double Hydroxides* (Hidróxidos Duplos em Camadas)

LIF: *Laser-Induced Fluorescence* (fluorescência induzida por laser)

LNPAL: Low Non-Aqueous Phase liquid (líquido de fase livre não aquosa leve)

MiHPT: *Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool* (sonda de interface de membrana e ferramenta de perfilamento hidráulico)

MIP: *Membrane Interface Probe* (sonda de interface de membrana)

MSW: *Municipal solid waste* (resíduos sólidos municipais)

NAPL: *Non-Aqueous Phase liquid* (fase líquida não aquosa)

OIHP: *Optical Image Hydraulic Probe Tool* (Sonda hidráulica de imagem óptica)

OIP: *Optical Image Profiler* (perfilador de imagem óptica)

PAH: *Polycyclic aromatic hydrocarbon* (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos)

PID: Photoionization detector (detector de fotoionização)

RPAS: *Remotely piloted aircraft systems* (sistemas de aeronaves pilotadas remotamente)

SQI: Substância química de interesse

VOC: *Volatile organic compounds* (compostos orgânicos voláteis)

XSD: Halogen specific detector (detector de compostos halogenados específicos)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das funções e dados alvos das técnicas de HRSC com uso de ferramentas de detecção direta por <i>direct-push</i> nesse trabalho.....	p.44
Quadro 2 – Resumo dos tipos de contaminantes alvos das técnicas de HRSC com as ferramentas de detecção direta por <i>direct-push</i> nesse trabalho.....	p.45
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens das técnicas de HRSC com uso de ferramentas de detecção direta por <i>direct-push</i> nesse trabalho.....	p.46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seleção de artigos de revisão sistemática da literatura sobre investigação em alta resolução (HRSC, do inglês <i>High Resolution Site Characterization</i>) com o uso de ferramentas de detecção direta por <i>direct-push</i>	p. 15
Figura 2 – Sonda <i>Hydraulic Profiling Tool</i> (HPT)	p. 19
Figura 3 – Diagramas esquemáticos do sistema MIP convencional com um espectrômetro de massa móvel acoplado (a), um sistema MIP com uma linha de transferência aquecida (b) e a amostragem acionada dependente da profundidade incluindo uma segunda linha de transferência (c).....	p. 22
Figura 4 – Sonda <i>Membrane interface probe</i> (MIP)	p. 24
Figura 5 – Princípio de funcionamento do <i>Membrane interface probe</i> (MIP)	p. 25
Figura 6 – Sonda <i>Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampler</i> (HPT- GWS)	p. 36
Figura 7 – Sonda <i>Optical Image Profile – UV</i>	p. 39
Figura 8 – Sonda <i>Optical Image Profile – G</i>	p. 40
Figura 9 – Abordagem Tríade.....	p. 42
Figura 10 – Economia geral de custos utilizando métodos de HRSC e desenvolvimento de melhores MCA para remediar plumas de águas subterrâneas contaminada.....	p. 47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS	13
3. JUSTIFICATIVA	13
4. METODOLOGIA.....	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5.1 Seleção dos trabalhos.....	14
5.2 O Modelo Conceitual da Área (MCA) e as heterogeneidades hidrogeológicas do meio...	16
5.3 Sistemas de sondas por <i>direct-push</i> (cravação contínua)	16
5.4 Investigação de alta resolução: HRSC - High Resolution Site Characterization	17
5.5 Investigação por Hydraulic Profiling Tool (HPT).....	19
5.6 Investigação por Membrane interface probe (MIP)	24
5.7 Investigação por <i>Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampler</i> (HPT- GWS)	36
5.8 Investigação por <i>Optical Image Profiler</i> (OIP).....	38
5.9 Abordagem Tríade e a HRSC.....	42
5.10 Análise das técnicas de investigação com o uso de ferramentas de detecção direta por <i>direct-push</i>	44
5.10.1 Comparação de técnicas de investigação de alta resolução nas classes de contaminantes	44
5.10.2 Vantagens e desvantagens das técnicas de investigação de alta resolução.....	46
5.10.3 Avaliação do custo-benefício.....	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXO A	54

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o gerenciamento de Áreas Contaminadas (AC) no Brasil deve seguir, à nível federal, as etapas definidas na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 420 de 28 de dezembro de 2009 (BRASIL, 2009). Alguns estados possuem sua própria resolução, como o estado de São Paulo. Por meio da Decisão de Diretoria A Nº 038/2017/C de 07 fevereiro de 2017 (CETESB, 2017), através das informações descritas no Anexo 2, o gerenciamento de AC é separado em duas etapas: o processo de identificação de AC e o processo de reabilitação de AC.

No processo de identificação de AC são desenvolvidas atividades para o aperfeiçoamento do Modelo Conceitual do Site (CSM, do inglês *Conceptual Site Model*), que é um instrumento para organizar e comunicar informações obtidas sobre uma determinada área ASTM, E1689-95(2014) . Assim, para que se avance para o processo de reabilitação de AC é fundamental a acurácia e exatidão no diagnóstico das áreas fontes, tanto na dispersão vertical quanto na horizontal da contaminação. Essas informações devem ser contempladas no Modelo Conceitual do Site (CSM). Segundo a CETESB (2017), a utilização de métodos de investigação de alta resolução é recomendada para a investigação de áreas com complexidades associadas ao meio e à distribuição das substâncias químicas de interesse não identificadas nas etapas de Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória.

Segundo Suthersan et al. (2015), a utilização de técnicas de investigação de alta resolução associadas a técnicas de investigação tradicionais proporciona a elaboração de um CSM mais adequado e em um tempo menor. No entanto, existem diversas técnicas de HRSC (por exemplo: *Membrane Interface Probe* (MIP); *Hydraulic Profiling Tool* (HPT); *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampling* (HPT-GWS); *Optical image profiler* (OIP)). No Brasil, devido aos custos de operação elevados ainda na fase de investigação e à falta de conhecimento técnico sobre as ferramentas de investigação de alta resolução disponíveis e sua forma de utilização com maior eficiência, essas técnicas ainda são pouco aplicadas. Embora seu uso seja recomendado pela CETESB na Decisão de Diretoria (DD) nº 38 publicada em 7 de fevereiro de 2017 (CETESB, 2017), ainda não há uma diretriz para o uso das ferramentas de HRSC no Brasil.

Assim, diante da relevância do uso dessas ferramentas de investigação de alta resolução para o aprimoramento do Modelo Conceitual do Site, este trabalho realiza uma revisão de literatura das técnicas de HRSC (*High Resolution Site Characterization*) com o uso de

ferramentas de detecção direta por *direct-push*, focada nas técnicas de MIP, HTP, HTP-GWS e OIP.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem o objetivo de realizar a revisão sistemática da literatura em relação aos estudos que apresentam a aplicação de técnicas de investigação de alta resolução com uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*. Os objetivos específicos foram:

- Realizar discussão sobre as ferramentas de detecção direta por *direct-push*: *Membrane Interface Probe* (MIP); *Hydraulic Profiling Tool* (HPT); *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampling* (HPT-GWS) e *Optical image profiler* (OIP);
- Compreender e comparar as técnicas em relação aos tipos de contaminação;
- Realizar a discussão sobre as vantagens e limitações de cada técnica de investigação em alta resolução;
- Analisar e verificar o custo-benefício da aplicação das técnicas de investigação em alta resolução.

3. JUSTIFICATIVA

A proposta dessa revisão de literatura justifica-se pelo fato de muitas das técnicas de investigação de alta resolução (HSRC) ainda serem pouco utilizadas no Brasil e, portanto, terem o conhecimento relacionado a sua aplicação pouco difundido. As técnicas de investigação convencionais vêm sendo executadas em uma escala de resolução inapropriada em relação à heterogeneidade do meio. Esta lacuna de informação resulta em modelos conceituais não representativos, o que interfere negativamente na etapa de reabilitação da área. As técnicas de HSRC proporcionam uma investigação do meio em escala apropriada, de acordo com sua heterogeneidade. Apesar dessa abordagem gerar custos mais elevados nas etapas iniciais do gerenciamento da área contaminada, os custos na etapa de remediação podem ser reduzidos significativamente, trazendo uma economia maior que o investimento empregado para o uso das técnicas de HSRC.

4. METODOLOGIA

Nesse trabalho, uma revisão sistemática da literatura foi realizada visando identificar o estado atual do conhecimento sobre a investigação em alta resolução com o uso de sondas geotécnicas. Com o objetivo de localizar, avaliar e reunir evidências sobre esse tópico, seguiu-se a seguinte metodologia:

- Busca bibliográfica em literatura nacional e internacional: artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos, livros e trabalhos de congressos. Para tanto, as seguintes bases de dados e/ou plataformas de pesquisa foram utilizadas: *Web of Science*, *Scopus*, *National Ground Water Association* e *Engineering Village*. Esta pesquisa foi realizada entre os dias 19 e 29 de agosto de 2021;

- Organização e triagem dos trabalhos pesquisados. Nessa etapa, foram selecionados para dar continuidade ao estudo os trabalhos com enfoque em investigação de alta resolução. Os termos utilizados na pesquisa geraram a seguinte *string* de busca: ("*high resolution site characterization*" OR "*high-resolution site characterization*" OR "*optical image profiler*" OR "*membrane interface probe*" OR "*hpt-gws*" OR "*hydraulic profiling tool*").

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente revisão abrange a literatura disponível dos anos de 2011 até 2021, sobre as investigações de alta resolução e suas ferramentas. Em vistas da extensão de tipos de ferramentas sobre HRSC, foram selecionados aquelas mais fundamentais e comumente usadas. Entretanto, estudos sobre a aplicação das técnicas de HRSC em diferentes tipos de solo e de contaminantes são muito recentes e ainda muito limitados na literatura científica disponível.

5.1 Seleção dos trabalhos

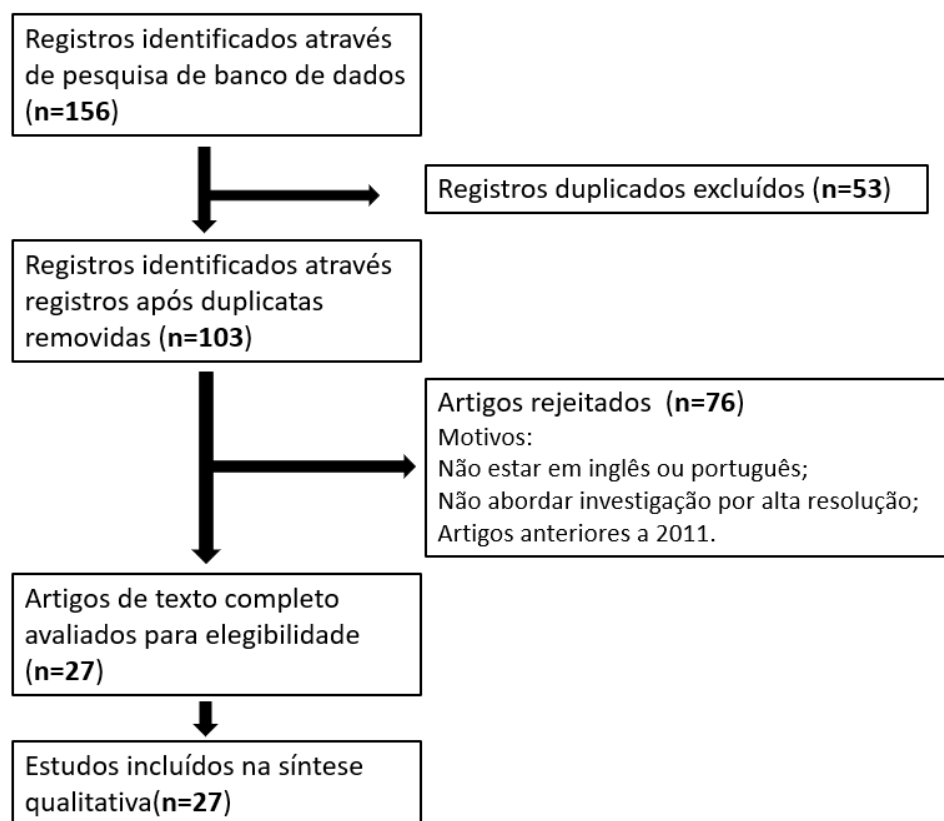
A busca bibliográfica rendeu 156 resultados (Figura 1). Esses 156 artigos foram avaliados quanto à existência de duplicatas, o que resultou em 105 registros sem duplicatas e 65 registros excluídos por serem artigos repetidos. Posteriormente, esses 105 registros foram avaliados quanto aos três critérios abaixo:

- Somente artigos em português e inglês são elegíveis;

- Os artigos deverão abordar termos referentes à investigação ambiental por alta resolução;
- Os artigos devem ser publicados posteriormente ao ano de 2011.

Após avaliação dos três critérios supracitados, um total de 76 artigos foram rejeitados. Deixando, assim, um total de 27 artigos na síntese da revisão da literatura (Anexo A).

Figura 1 – Seleção de artigos de revisão sistemática da literatura sobre investigação em alta resolução (HRSC, do inglês *High Resolution Site Characterization*) com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*.



Fonte: Elaboração própria

A maior parte dos estudos foram realizados na Europa e na América do Norte, locais de clima temperado. Os primeiros estudos com casos no Brasil com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push* de alta resolução estão sendo publicados. A maioria dos estudos encontrados são as funcionalidades das sondas HPT e MIP e estudos de casos. Sobre as demais ferramentas de alta resolução, houve somente dois artigos sobre HPT-GWS (MCCALL; CHRISTY, 2020);(DUTTA, et.al.,2021) e outros dois artigos sobre OIP (DUTTA, et.al.,2021); (MCCALL et.al.,2018).

5.2 O Modelo Conceitual da Área (MCA) e as heterogeneidades hidrogeológicas do meio

Segundo RIYIS et al. (2019), o MCA é o entendimento completo do meio físico, das substâncias químicas de interesse (SQIs), das fontes primárias e secundárias de contaminação, bem como das vias de exposição e dos receptores. O MCA é uma ferramenta fundamental para a gestão das áreas contaminadas. Tem a função de ser a hipótese científica a ser testada, modificada e redefinida até que as incertezas sejam diminuídas, com a finalidade de possibilitar as tomadas de decisão mais confiáveis para a área (RIYIS, 2012). Assim, um MCA confiável embasa as medidas de intervenção eficientes, diminuindo custos excessivos e tornando o cronograma de trabalho mais eficaz.

Para que o MCA seja adequado e eficiente, um fator de grande importância é o entendimento das características geológicas e hidrogeológicas do site. Dessa forma, uma etapa crítica é a coleta de dados em campo, que pode carregar mais incertezas pela natureza do trabalho (RIYIS et al., 2019). Segundo RIYIS et al. (2019), as heterogeneidades hidrogeológicas da área são os fatores mais críticos no processo de formulação do MCA, pois há grande variação nas ordens de grandeza do meio. Segundo o ITRC (2015), essa variação na heterogeneidade hidrogeológica é proveniente das diferenças na geometria dos poros do material constituintes da matriz geológica. Assim, a migração descendente do contaminante resulta em instabilidade de fluxo ao longo dos poros do meio físico do aquífero, resultando em uma distribuição aparentemente desordenada. Segundo RIYIS (2019), essas variações estão comumente presentes mesmo em formações aparentemente homogêneas, tornando desafiadora a detecção da massa de contaminante residual imóvel e levando à necessidade de entender melhor o fluxo hidrogeológico na área de estudo.

Dessa forma, as técnicas de investigação de alta resolução deve ser utilizadas para coletar o máximo possível de informações do meio, tais como: perfil estratigráfico, direção e sentido preferenciais de fluxo tridimensional de água subterrânea, delimitação dos aquíferos e aquitardes, parâmetros hidráulicos (como condutividade hidráulica (K), gradiente hidráulico (i), entre outros), e espessura dos aquíferos (SUTHERSAN et al., 2015).

5.3 Sistemas de sondas por *direct-push* (cravação contínua)

Segundo Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* (USEPA), (2018), as plataformas de *direct-push* (cravação contínua) tem ganhado grande aceitação na indústria ambiental na última década, devido a sua versatilidade,

o custo relativamente baixo e a mobilidade. As unidades de *direct-push* usam pressão hidráulica para avançar dispositivos de amostragem e sensores geotécnicos e analíticos no solo, como as sondas de alta resolução discutidas nesse trabalho.

As ferramentas de detecção direta por *direct-push* são empurradas (cravadas) no solo usando a força da percussão de um martelo hidráulico, no entanto em solos com maior permeabilidade é possível usar somente o peso estático do veículo transportador. Maiores profundidades de penetração podem ser alcançadas combinando o peso do veículo e a percussão do martelo hidráulico. Algumas características dos sistemas de *direc-push* são apresentadas a seguir, segundo IRTC (2018):

- Os sistemas de *direc-push* são mais rápidos e mais móveis do que perfuratrizes tradicionais;
- Os sistemas de *direc-push* não tem mastros altos, assim podem ser operados em locais com maior restrição de espaço físicos ou redes elétricas;
- Os sistemas de *direc-push* são limitados a formações litológicas não consolidadas. Esses sistemas não podem ser usados para avançar em camadas rochosas, alicerces ou fundações de concreto; camadas com cascalho também podem interromper o avanço das sondas;
- Mudanças na densidade geológica podem limitar o uso de sistemas *direct-push*. A presença de camadas moles sobrepostas às camadas duras pode alterar o alinhamento da sonda e entortar ou quebrar haste.

5.4 Investigação de alta resolução: HRSC - High Resolution Site Characterization

Segundo a definição da Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* (USEPA)), HRSC são estratégias e técnicas que utilizam uma escala de medição e uma densidade de amostragem apropriada para definir a distribuição de contaminantes com um grau maior de certeza, em um determinado meio físico, embasando remediações mais rápidas e efetivas. Dessa forma, as técnicas de HRSC resultam em uma compreensão adequada da distribuição da contaminação, que permitem uma avaliação, seleção, concepção e implementação de tecnologias de remediação *in situ* mais eficientes e confiáveis.

O uso de HRSC promovem opções de técnicas de investigações mais direcionadas, permitindo a construção de um CMS mais adequado à situação da área e proporcionando um melhor entendimento das características litológicas, da distribuição de contaminantes, do

volume e da massa presente no meio. Segunda a USEPA, o desenvolvimento de tecnologias e estratégias de investigação de alta resolução fornecem opções para processos de remediação *in situ* mais eficazes, pelas seguintes formas:

- Caracterizar as condições hidrogeológicas para o projeto de remediação em uma escala que os métodos convencionais de investigação não conseguem atingir;
- Identificar com maior eficiência a(s) fase(s) de massa contaminante que estão presentes (por exemplo, fase líquida não aquosa (NAPL), dissolvida, absorvida e vapor);
- Fornecer maior confiança de que um site é totalmente caracterizado pelo aumento da densidade de dados;
- Permitir uma estimativa mais precisa da massa e volume do contaminante por meio da identificação e delineamento mais rigorosos da fonte;
- Melhorar o custo e o desempenho do monitoramento da remediação, minimizando as necessidades de redes de monitoramento.

ITRC (2019) divide as ferramentas de investigação de alta resolução, em quatro categorias, são elas:

I. **Ferramentas de detecção direta:** são aquelas que medem o parâmetro de interesse por meio do contato direto ou por amostragens discretas em posições específicas, sendo introduzidas na subsuperfície por meio de tecnologias *direct-push* e, portanto, limitadas à investigação de formações não consolidadas. Diferentes sensores podem ser adicionados nessas ferramentas para fornecer registros quanto a litologia e permeabilidade do meio, e quanto à presença de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e de líquidos de fase não aquosa (NAPLs, do inglês *Non-Aqueous Phase Liquid*). Essa revisão de literatura tem foco nessas ferramentas, em especial as de perfilamento hidráulico como HPT (*hydraulic profiling tool*), sonda de interface de membrana (MIP *membrane interface probe*), e HPT *groundwater profiler* (HPT-GWP) e perfilador de imagem óptica (OIP – *optical image profiler*).

II. **Ferramentas geofísicas de sondagens:** Essas ferramentas fornecem dados geológicos, hidrogeológicos e geoquímicos de alta resolução, que auxiliam no desenvolvimento de CSMs robustos. A geofísica de sondagem é melhor aplicada onde os métodos de detecção direta não podem ser usados (normalmente em locais muito densos ou muito profundos). Certas ferramentas geofísicas de sondagem (ressonância magnética nuclear (NMR), gama natural, indução) podem ser usadas em poços existentes como uma alternativa econômica para perfurar

novas sondagens ou usar métodos de detecção direta. Ferramentas geofísicas de sondagens também podem fornecer dados sobre parâmetros que não podem ser obtidos com ferramentas de detecção direta, como porosidade.

III. **Ferramentas geofísicas de superfície:** são instrumentos geofísicos não intrusivos usados para avaliar a subsuperfície. Essas ferramentas medem indiretamente as propriedades físicas dos materiais, a partir de sinais produzidos por fontes naturais ou geradas, por meio de contraste das respostas de diferentes tipos de materiais. Ferramentas geofísicas de superfície são geralmente portáteis e podem cobrir grandes áreas. Por se tratar de um método indireto, requer correlação ou interpretação, estando sujeitas a erros de interpretação.

IV. **Ferramentas de sensoriamento remoto:** são ferramentas que, geralmente, usam sensores baseados em satélite ou aeronaves para detectar e classificar objetos na superfície do solo. A crescente disponibilidade de sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS, do inglês *remotely piloted aircraft systems*), como drones, abriu novas oportunidades para sensoriamento remoto e estimulou o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações que estão sendo utilizadas na extensão espacial típica das atividades de caracterização de sites.

5.5 Investigação por Hydraulic Profiling Tool (HPT)

A sonda HPT (Figura 2) é uma sonda de perfilagem por *direct-push* com 21,5 pol. (546 mm) de comprimento e 1,75 pol. (44,5 mm) no diâmetro máximo. Uma malha de aço inoxidável cobre a porta de injeção HPT, que tem cerca de 0,4 pol. (10 mm) de diâmetro. O design da sonda ajuda a manter um bom contato entre a formação e a face da tela durante o avanço. A pressão da água na face da tela evita o entupimento. (GEOPROBE, 2016).

Figura 2 – Sonda Hydraulic Profiling Tool (HPT)



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2016).

O sensor de pressão é instalado logo acima da sonda, no tubo de conexão para que as medições de pressão sejam feitas no orifício. Isso fornece a medição da pressão necessária para injetar água na formação em uma dada vazão e profundidade. Cada sensor de pressão é calibrado da pressão atmosférica (14,7 psi / 101 kPa) a 80 psi (552 kPa) usando pressão de ar e um transdutor de pressão certificado pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Os pontos de calibração se ajustam melhor a uma linha reta ao longo da faixa de pressão e cada transdutor é calibrado independentemente.

A sonda HPT cria perfis das propriedades hidráulicas do solo, que podem ser utilizadas para mensurar a permeabilidade e a condutividade hidráulica do local. A mensuração da pressão estática (teste de dissipação) também pode ser realizada quando a sonda é paralisada em intervalos discretos, e proporciona uma estimativa do nível do lençol freático (nível d'água), com base na carga hidráulica imposta sobre a sonda em repouso, comparada com a pressão medida na superfície antes de cada sondagem (MILANI, 2021).

A experiência indica que a sonda HPT fornece resolução em escala de polegadas (2–3 cm) de mudança de pressão na direção vertical para material com permeabilidade contrastante, por exemplo, areia-argila. No entanto, a porta fornece sensibilidade limitada na direção horizontal, de modo que a variabilidade lateral além de alguns centímetros da porta pode tornar difícil ou impossível de distinguir. Dessa forma, isso permite que o sistema HPT detecte mudanças nos recursos verticais de pequena escala que podem ocorrer entre as sondagens obtidas com apenas um metro de distância (MCCALL et al., 2014).

McCall e Christy (2020) apresenta a sonda HPT como um sistema de perfilagem por *direct-push*. O autor mostra que a sonda pode avançar com máquinas de sondagem de percussão ou máquinas tipo CPT para profundidades superiores a 20 m ou 30 m, respectivamente. Um perfil (log) com 20 metros de profundidade geralmente pode ser concluído em 90 minutos. No entanto, pode haver dificuldade de avançar em formações com cascalho, grandes pedras, pedregulhos e leito de rochas. McCall e Christy (2020) ressalta, por meio do perfil de pressão de injeção versus a profundidade e perfil de condutividade elétrica versus a profundidade, que é possível identificar zonas de baixa permeabilidade (pressão elevada) e alta permeabilidade (baixa pressão) que podem se comportar como aquíferos ou zonas transmissivas, respectivamente. Além disso, a ferramenta auxilia na definição da litologia vertical e permeabilidade em um local para orientar a amostragem, colocação de poço ou atividade de remediação (injeção de fluido etc.). Múltiplos registros em uma seção transversal ou grade 3D podem ajudar a definir a hidroestratigrafia em todo o local, em alta resolução, de uma maneira econômica e em menor tempo, não disponível em tecnologias anteriores. Diferentes *softwares*

de outras empresas estão disponíveis para criar modelos de visualizações 2D e 3D da pressão HPT e dados de EC da litologia do site.

McCall e Christy (2020) também ressalta a importância do teste de dissipação de pressão, que pode ser conduzido abaixo da superfície piezométrica, interrompendo o avanço da sonda (deixando-a parada) e desligando o fluxo de injeção. Esses testes são, geralmente, realizados em zonas transmissivas para definir rapidamente a pressão piezométrica em profundidades selecionadas. O cálculo posterior com o *software* de visualização pode definir o perfil piezométrico e a superfície piezométrica (nível da água do lençol freático).

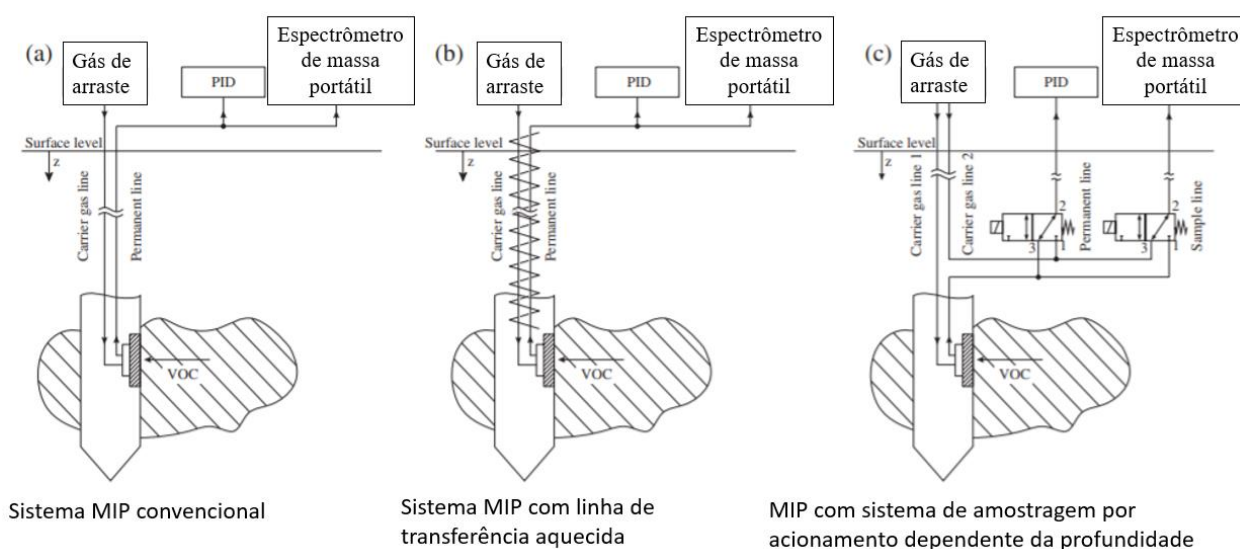
Outra vantagem dessa ferramenta é a possibilidade de ser combinadas com outras ferramentas de perfilagem de contaminantes (por exemplo, MIP, OIP, LIF). Os perfis de pressão provenientes da HPT (Pc log) podem ajudar a definir as vias de migração de contaminantes de alta permeabilidade e camadas de baixa permeabilidade, que podem impedir a migração de contaminantes. Alternativamente, aumentos bruscos na pressão HPT podem identificar contatos de formação onde DNAPLs irão se acumular. Mais tarde, as camadas contaminadas de baixa permeabilidade podem se comportar como fontes secundárias, onde os contaminantes difundem de volta para as zonas transmissivas adjacentes. Além disso, nesse estudo o sistema de perfilagem HPT-EC (EC log) demonstrou indícios de ser uma ferramenta valiosa para a investigação e mapeamento de muitos depósitos da Idade Quaternária. Quer seja combinado com ferramentas de perfilagem de contaminantes para investigar instalações contaminadas ou usado sozinho para avaliar litologia e hidrostratigrafia, a sonda HPT pode ser uma ferramenta poderosa para investigação de formações não solidificadas (MCCALL, 2020).

McCall *et al.* (2014), por sua vez, ressalta a importância da avaliação dos perfis de pressão e de EC para a definição da litologia. Em estudo de campo em Skuldelev, Dinamarca, a argila exibiu EC baixa, semelhante aos valores observados nas areias e cascalhos adjacentes, o que não era esperado. Devido a isso, percebeu-se que os perfis de EC não podiam distinguir claramente entre as camadas de granulação grossa e fina da formação do site. Os registros (perfis) de pressão HPT definiram claramente a diferença na permeabilidade entre a argila (alta pressão HPT) e sedimentos de granulação grossa (baixa pressão HPT). A resposta de pressão HPT foi confirmada com a coleta de testemunhos do solo em locais selecionados e *slugs tests* em intervalos distintos na área. Dessa forma, para avaliar com o máximo de precisão possível é necessário utilizar os perfis de pressão gerados pelo HPT, ao invés de somente os perfis de EC.

Jan Bumberger, *et al.* (2016) apresenta um trabalho com objetivo de comparar (1) um sistema MIP convencional com uma linha de transferência não aquecida, (2) um sistema MIP

convencional com uma linha de transferência aquecida e (3) um sistema MIP com um novo sistema de amostragem acionada dependente da profundidade que inclui duas linhas de transferência (Figura 3). Este efeito resulta em tempos de retenção específicos do composto, que são mostrados em sinais de medição desproporcionalmente altos após a penetração real em zonas contaminadas. Em consequência, a menor extensão da contaminação não é claramente identificável e pode ser superestimada. O estudo de campo apresentado mostra uma avaliação de diferentes métodos para superar o efeito de transporte, especialmente no que diz respeito aos tempos de medição exigidos que são necessários para esperar o desaparecimento completo dos sinais do detector antes de encaminhar a sonda.

Figura 3 – Diagramas esquemáticos do sistema MIP convencional com um espectrômetro de massa móvel acoplado (a), um sistema MIP com uma linha de transferência aquecida (b) e a amostragem acionada dependente da profundidade incluindo uma segunda linha de transferência (c).



Fonte: Adaptado de Jan Bumberger et al. (2016).

Uma comparação com os resultados analíticos de amostras de solo deu uma boa correlação para todos os três métodos. Além disso, foi mostrado que o uso de uma linha de transferência aquecida tem uma melhoria de tempo de 30% em comparação com uma linha de transferência não aquecida, enquanto a amostragem acionada dependente da profundidade usando duas linhas de transferência separadas rendeu uma melhoria de tempo de mais de 90%. Esses resultados confirmam o benefício do último método, particularmente para o uso em sedimentos altamente contaminados. Portanto, o sistema de amostragem por acionamento (*triggered sampling*) é recomendado para uma aplicação economicamente viável de MIP em locais com solo altamente contaminado. Além disso, o método *Low-level MIP* (LL-MIP) para

a medição de baixas concentrações de contaminantes será incorporado automaticamente, assim o sistema de amostragem por acionamento (*triggered sampling*), também deve ser a escolha para locais levemente contaminados. (BUMBERGER et al., 2016).

Rosenberg (2021) apresenta o uso da sonda HPT em conjunto com a sonda MIP (MiHPT) para investigar o gradiente hidráulico vertical através de uma argila, até sobrepor um aquífero arenoso em um local contaminado na Dinamarca. Na estimativa do gradiente hidráulico vertical, apenas a sonda HPT é necessária, embora seu uso em conjunto com a sonda MIP possibilite quantificar as concentrações específicas de contaminantes no site, permitindo uma melhor avaliação de risco.

Nesse estudo de campo, o autor investigou a possibilidade de estimar o gradiente hidráulico vertical entre dois aquíferos separados por uma camada de baixa permeabilidade, como a de argila, usando a ferramenta MiHPT. Uma comparação entre o MiHPT e os poços aninhados emparelhados em cinco unidades de estratigráficas diferentes de areia mostrou uma concordância muito boa entre as duas abordagens, evidenciando que é possível investigar o nível de contaminante relativo, a hidrogeologia da subsuperfície e o gradiente hidráulico vertical, usando o MiHPT. A carga de trabalho diária adicionada no campo para investigar o gradiente hidráulico vertical foi de 25 minutos, mas esse tempo pode variar, dependendo da permeabilidade do solo e do material do aquífero em questão (ROSENBERG, 2021).

Borden (2021) faz uso de uma equação com base física para estimar a condutividade hidráulica pela taxa de injeção de água (Q) e pressão (Pc) medida durante a perfilagem com o uso da HPT. A nova equação de estimativa K (Equação 1), proposta pelo autor, é desenvolvida usando resultados de simulação abrangendo uma gama de propriedades de formação (K e Ss) e parâmetros operacionais HPT (velocidade de avanço e taxa de injeção).

$$(1) \quad K = E (0.1235 VD^2 + 0.119Q) P_c^{-1.017}$$

Onde:

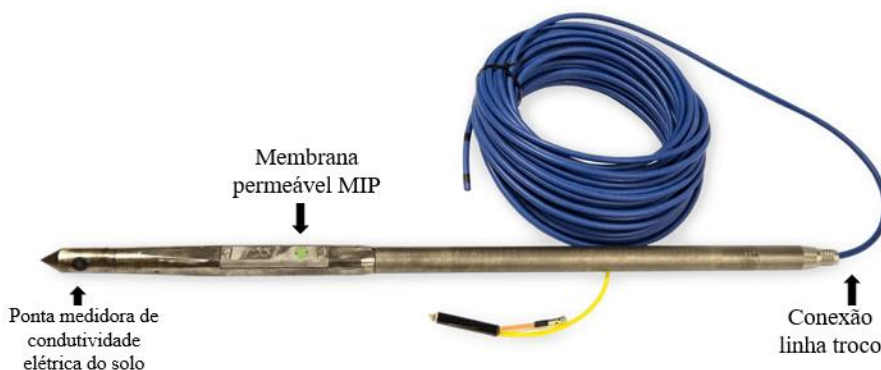
- D: diâmetro da sonda (cm);
- V taxa de avanço da sonda (cm/s);
- Q: taxa de injeção da água (mL/min);
- E: fator de eficiência hidráulica derivado empiricamente;
- Pc: pressão corrigida (psi); e
- K: condutividade hidráulica (pés/d).

Essa relação foi validada por 23 perfis de HPT, sendo que os resultados médios de K no perfil vertical foram semelhantes aos resultados do *slugs tests* em poços de monitoramento adjacentes aos perfis. O melhor valor de ajuste de E para esses perfis foi 2,02. Esta equação fornece uma abordagem baseada no meio físico para gerar perfis de condutividade hidráulica com ferramentas HPT. O autor sugere que pesquisas adicionais são necessárias para compreender os impactos das características do aquífero (BORDEN, 2021).

5.6 Investigação por Membrane interface probe (MIP)

O MIP (Figura 4) é uma sonda de perfilagem por *direct-push* com sistema de medição em tempo real, capaz de fornecer dados contínuos sobre compostos orgânicos voláteis (VOCs), como, por exemplo, hidrocarbonetos de petróleo voláteis e contaminação por solvente, junto com a condutividade elétrica do solo e a permeabilidade (GEOPROBE, 2012).

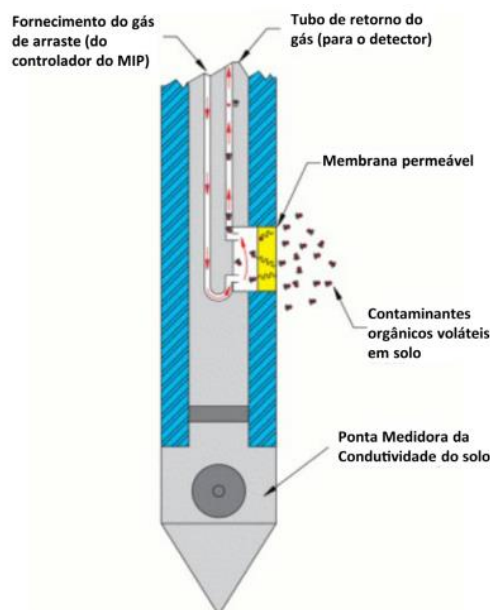
Figura 4 – Sonda *Membrane interface probe* (MIP)



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2012).

Segundo Milani (2021), a sonda do MIP é equipada com uma membrana porosa de politetrafluoretileno acoplada a uma chapa de aço inoxidável. Essa chapa é aquecida eletricamente até a faixa ótima de temperatura (i.e., de 100 a 120°C) para estimular o particionamento dos VOCs presentes no solo e/ou na água subterrânea próxima a ponta da sonda, fazendo com que esses compostos se volatilizem (Figura 5).

Figura 5 – Princípio de funcionamento do *Membrane interface probe* (MIP)



Fonte: Milani (2021). Adaptado de Geoprobe (2017).

Os VOCs, até um determinado tamanho molecular (i.e., moléculas do tamanho do naftaleno ou menores) difundem pela membrana sob o efeito de um gradiente de concentração e são transportados por um gás de arraste (i.e., nitrogênio) por uma alça de tubulação (i.e., linha tronco). Os compostos orgânicos são carregados até a superfície, onde passam por três sensores químicos:

- Detector de fotoionização (PID, do inglês *photoionization detector*), consiste em um detector não destrutivo (podendo ser usado em série com outros tipos de detectores) que utiliza comumente uma lâmpada ultravioleta (UV) de 10,6 elétron volt (eV), que ioniza compostos com potencial de ionização menor do que 10,6 eV (Figura 2), incluindo compostos orgânicos aromáticos, compostos clorados que possuem átomos de carbono em ligação dupla (Carbono C=C), como tricloroeteno (TCE) e tetracloroeteno (PCE), entre outros, montada em uma célula eletrolítica termostaticamente controlada, de baixo volume e fluxo contínuo;

- Detector de ionização de chama (FID, do inglês *flame ionization detector*), que utiliza uma chama de hidrogênio para promover a combustão dos compostos dentro do gás de arraste para medição dos hidrocarbonetos de cadeia linear, por exemplo, o metano e concentrações elevadas de alguns compostos clorados. Um potencial é aplicado na ponta do queimador e no eletrodo coletor;

- Detector de compostos halogenados específicos (XSD, do inglês *halogen specific detector*), que consiste em uma sonda de cerâmica, um fio de platina (ânodo) e um grânulo de platina (cátodo) montado no interior de um reator de alta temperatura, sensível a átomos de halogênio, incluindo bromo, cloro e flúor.

O MIP é um dispositivo especial de investigação que elimina as desvantagens da amostragem de água subterrânea por bombas elevadoras e separa os voláteis após aumentar o volume da amostra. Contaminantes voláteis podem ser perdidos durante a amostragem de águas subterrâneas. Este problema pode ser evitado pela implantação de sensores específicos de substância na água subterrânea e purga quantitativa in situ dos componentes voláteis da água subterrânea. Isso pode ser feito por um MIP que, na verdade, é uma membrana semipermeável aquecida, uma interface entre a matriz do solo e o detector. As moléculas voláteis que se movem através da membrana são transportadas para o detector por um gás de arraste neutro. Os sensores geralmente são colocados na superfície do solo, e o gás de arraste de temperatura constante move os vapores para os detectores de fundo de poço (GRUIZ et al., 2016).

McCall *et al.* (2014) usa a combinação das sondas *Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool* (MiHpt). Ao combinar essas duas sondas em um sistema de perfilagem, obtém-se dados úteis sobre a distribuição de ambos os contaminantes orgânicos voláteis (VOCs) e a permeabilidade de formação relativa em uma única perfuração. O registro do MiHpt foi conduzido em um site contaminado com VOC clorado em Skuldelev, Dinamarca, para avaliar o desempenho do sistema.

O sistema detector MiHpt-XSD, que combina as ferramentas MiHPT e o XSD de detector de compostos halogenados específicos, foi eficaz em determinar a distribuição geral e as concentrações relativas dos contaminantes compostos orgânico voláteis halogenados (X-VOC), em Skuldelev. Também foi possível verificar que a distribuição de contaminantes, conforme definido pelas amostras de água subterrânea, era muito semelhante a pluma, segundo os registros do detector MiHpt-XSD. Nos resultados, percebe-se que a pluma de água subterrânea foi deslocada ligeiramente para cima na formação, em relação à pluma definida pelos registros do detector MiHpt-XSD. Isso pode acontecer devido a um atraso na resposta ao sistema detector MiHpt-XSD, possivelmente resultante de um valor de tempo baixo de viagem ou taxa de fluxo decrescente para o gás de arraste, quando o registro foi executado. As amostras de água subterrânea coletadas adjacentes a um perfil de MiHpt-XSD, que não detectou X-VOC, tiveram detecções para compostos voláteis e DCE (1,2-Dicloroetano) na faixa de concentração de 100 a 300 µg/L. Isso indicou que o sistema MiHpt-XSD usado teve dificuldade em detectar esses analitos nesta faixa de concentração, na formação de granulação grossa saturada

investigada. O autor indicou o uso de um sistema MIP de baixo nível, o *Low Level- MIP* (LL-MIP) na data de publicação do trabalho (MCCALL *et al.*, 2014).

Enquanto as amostras de água subterrânea corresponderam bem aos resultados do detector MiHpt-XSD, os resultados das amostras de solo tiveram uma variação significativa no mesmo local e em intervalos de profundidade semelhantes. As observações de campo (drenagem de água dos poros) e a avaliação de amostras duplicadas e replicadas indicam que a amostragem de solo para VOCs muitas vezes sofre de várias limitações inerentes (heterogeneidade, perda de VOCs etc.) e os resultados analíticos podem não ser confiáveis para comparação com os perfis do MiHpt-XSD sob algumas condições de campo (McCALL, 2014).

O autor concluiu que os registros dos perfis MiHpt provaram ser úteis na definição da distribuição e dos níveis de contaminantes. Os resultados do estudo indicam que os dados de alta resolução dos perfis MiHpt fornecem uma ferramenta poderosa para definir um modelo conceitual de local preciso, e devem ser valiosos ao desenvolver uma estratégia de remediação (McCALL *et al.*, 2014).

CHO *et. al.* (2011) descreve o treinamento de um novo nariz eletrônico (EN, do inglês *Electronic Nose*) integrado com uma sonda de interface de membrana (MIP) para a detecção de compostos orgânicos voláteis (VOCs) na água. O nariz eletrônico é um dispositivo automático de reconhecimento de odores que detecta e identifica vapores químicos com base nos princípios do olfato humano. O MIP foi combinado com um conjunto de sensores EN consistindo em quatro sensores diferentes do gás de óxido de estanho.

O sistema EN foi calibrado em meio aquoso enriquecido com benzeno, tolueno, etilbenzeno e p-xileno (BTEX) em diferentes concentrações. O experimento foi conduzido utilizando cinco repetições para cada analito. Os dados foram analisados por meio de modelos inteligentes, como métodos estatísticos e redes neurais artificiais, são elas: *Multi-Layer Perceptron* (MLP) e *General Regression Neural Network* (GRNN) (CHO *et. al.*, 2011).

Os modelos treinados mostraram excelentes capacidades de previsão. A análise de componentes principais revelou conter 99% da variância da amostra em dois dos componentes principais, ao mesmo tempo que fornece resultados precisos e separáveis. A análise de componentes principais mostrou que os dois primeiros continham mais de 99% das informações de variância e que os compostos BTEX eram separáveis e facilmente classificados. Ambos os métodos da rede neural empregados entregaram boas taxas de reconhecimento com uma precisão de 91,7% e 100%, para o MLP e GRNN, respectivamente (CHO *et. al.*, 2011).

Algreen *et.al.* (2015) apresenta a inclusão do sensor MIP em uma sequência de métodos de investigação para a caracterização de um megasite, uma antiga base aérea militar soviética

com provável contaminação por combustível, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX) em águas rasas subterrâneas e subsolo. Os métodos de investigação realizados foram: (i) fitovarroredura com amostragem de tronco de árvores (*tree core sampling*); (ii) medições de gás do solo para CH₄, O₂ e detector de fotoionização (PID); (iii) uso de sensor MIP e sensores de fluorescência induzida por laser (LIF, do inglês *Laser – Induced Fluorescence*) por *direct-push*; (iv) amostragem direta; e (v) amostragem de solo e de poços de monitoramento de água subterrânea.

Por meio da aplicação de sensores *direct-push* (MIP e LIF), foi possível coletar informações 3D sobre a extensão e o volume da pluma de subsuperfície. O sensor LIF calibrado para querosene deu sinais nítidos para o delineamento da fase livre TPH (aqui, querosene). Além disso, também foi possível coletar informações sobre os níveis de água subterrânea, as características hidráulicas e as propriedades da textura do solo por essas ferramentas. A comparação dos resultados da amostragem convencional de solo e água subterrânea (de poços) com os da análise química confirmou os resultados dos métodos de pré-triagem e as ferramentas de *direct-push* utilizadas. Outro ponto importante, as informações fornecidas pelos métodos de *direct-push* também serão relevantes para a remediação, como nível de água subterrânea, volume de contaminação e propriedades de subsuperfície (ALGREEN *et.al.*, 2015).

Martac e Dandashi (2020) apresentam uma estudo sobre melhores práticas em sites contaminados por óleo, sobretudo de produto em fase livre (NAPL), que podem ser altamente afetadas por esquemas de amostragem tradicionais, que muitas vezes podem não perceber os corpos contaminantes. Dessa forma, os autores utilizam métodos de alta resolução como *Membrane Interphase Probe* (MIP), *Laser Induced Fluorescence* (LIF), *Hidraulic Perfil Tool* (HPT), Condutividade Elétrica (EC), Teste de Penetração do Cone (CPT), são reconhecidos como métodos rápidos de caracterização de sites, pouco invasivos e econômicos em termos de contaminação, hidráulica e litologia.

Nesse estudo verificou-se que os sistemas MIP e HPT não foram tão efetivos quanto o LIF, que exhibe vantagens significativas sobre as técnicas de investigação tradicionais. Especialmente para detecção e delineamento de NAPL, uma implantação de LIF seguida por amostragem de solo orientada para o alvo complementar fornece a chave para modelos de sites confiáveis. Neste estudo não foi avaliado o uso do OIP, que possui funcionalidades semelhantes ao LIF (MARTAC; DANDASHI, 2020). Cohen *et al.* (2016), apresentam outro estudo abordando as limitações do uso de MIP para delinear a posição das camadas LNAPL, pois a abordagem MIP não mede a quantidade de óleo no subsolo.

Adamson *et al.* (2014) desenvolveu um protocolo para o uso da sonda MIP como uma ferramenta de aquisição de dados rápida e de baixo custo, para avaliar qualitativamente a localização e distribuição relativa de massa de contaminantes em áreas com baixa condutividade hidráulica (k). A caracterização precisa da massa do contaminante em zonas de baixo k é de grande importância, pois o contaminante em fase livre geralmente é difícil de tratar e pode ser uma fonte secundária a longo prazo. Além de incluir recomendações para: (1) o detector preferido, neste estudo foi utilizado um detector de captura de elétrons, do inglês *electron capture detector* (ECD) para zonas de baixa concentração, PID ou ECD para zonas de concentração mais alta; (2) combinação de dados com sonda em direção a avanço e em direção oposta para reduzir o transporte; e (3) maior taxa de fluxo de gás de arraste em zonas de alta concentração.

O autor variou os parâmetros operacionais de MIP sistematicamente em locais de alta e baixa concentração em um site contaminado, para avaliar o impacto dos parâmetros na qualidade dos dados em relação a um perfil adjacente detalhado de concentrações de solo. A avaliação da localização relativa das concentrações máximas e a forma dos MIP vs. os perfis do solo levaram a um procedimento operacional padrão (SOP) para o MIP, para delinear a contaminação em zonas de baixo k (ADAMSON *et al.*, 2014).

A capacidade do MIP de resolver a contaminação em zonas de baixo k tão bem quanto em zonas de alto k foi constatada, além de como sua eficácia geral não se limita a tipos específicos de solo (ADAMSON *et al.*, 2014). A capacidade do MIP em coletar uma grande quantidade de dados de profundidades distintas é valiosa para demonstrar a distribuição horizontal e vertical geral da contaminação em um site nas áreas de transporte e de baixo k .

No desenvolvimento do protocolo, três medidas foram consideradas particularmente valiosas: (1) usar alta taxa de fluxo de gás de arraste em locais de alta concentração para reduzir o transporte por meio de diluição da massa de contaminante, (2) coletar dados de MIP na direção oposta (“*uplogging*”), além da direção normal (para baixo), para ajudar a estabelecer a base e o topo de um intervalo contaminado, e (3) usar o melhor detector para a mistura de contaminantes específicas, em determinadas condições de concentração desses contaminantes (ADAMSON, 2014).

Esses três e outros procedimentos relacionados resultaram em perfis de MIP corrigidos mais representativos da contaminação em toda a extensão vertical do intervalo caracterizado. Os resultados do estudo demonstram a utilidade do MIP na localização de contaminação em zonas de baixo k , determinando até que ponto as relações de magnitude relativa podem (ou devem) ser estabelecidas quantitativamente, e pesando o custo-benefício dos dados de MIP em

relação a outros métodos de caracterização. O MIP ajuda a revelar a presença e distribuição relativa de contaminação dentro de intervalos de k inferior, que são frequentemente ignorados nos esforços convencionais de caracterização dos sites (ADAMSON *et al.*, 2014).

No entanto, os resultados de Adamson *et al.* (2014) enfatizam também que os dados do MIP (mesmo se coletados usando o protocolo desenvolvido) não refletem necessariamente com precisão detalhada a heterogeneidade real de contaminantes em pequena escala. Os dados do MIP podem fornecer uma falsa sensação de confiança, sugerindo que as heterogeneidades em pequena escala são bem compreendidas, particularmente quando não comparadas aos dados centrais do solo. Os resultados do estudo demonstram que se deve tomar cuidado ao tentar usar os dados MIP para prever as concentrações de solo devido a fatores como atribuição de profundidade, heterogeneidade espacial e limitações em métodos de regressão linear comumente usados. Assim, sendo recomendado a coleta de amostras de solos e de água subterrânea para minimizar as incertezas dos dados do MIP em camadas com baixa condutividade hidráulica (ADAMSON *et al.*, 2014).

Christy *et al.* (2015) apresenta uma nota ao editor referente ao estudo supracitado de Adamson *et al.* (2014). Grande parte deste artigo se refere à limitação do uso do detector ECD para o registro MIP de compostos orgânicos voláteis clorados (CVOCs). Dois tópicos importantes discutidos incluem a saturação do detector de ECD em zonas de alta concentração de contaminantes e sua insensibilidade aos dicloro-compostos. Deve-se notar que o “Detector específico de halogênio” ou XSD substituiu amplamente o ECD como o detector preferido para registro perfil do MIP de CVOCs. Assim, ao contrário do ECD, que possui comportamento diferente entre zonas com baixas e altas concentrações, o XSD tem uma resposta uniforme aos CVOCs independente da estrutura molecular, possui uma ampla faixa linear e não sofre a saturação experimentada pelo ECD.

Milani (2021) apresenta um estudo de caso com uso do MIP para investigação de hidrocarbonetos de petróleo, em uma área localizada no município de Duque de Caxias, Rio de Janeiro. Segundo a autora, os resultados obtidos por meio das investigações tradicionais foram insuficientes para a compreensão das características físicas e geoquímicas necessária para o sucesso das fases de diagnóstico e, conseqüentemente, da remediação. Dessa forma, técnicas de investigações em alta resolução foram conduzidas com o objetivo de refinar o modelo conceitual, dentre elas o uso da sonda MIP.

O plano de investigação preliminar com uso de MIP foi elaborado com base nos resultados da investigação passiva dos vapores do solo, com o intuito de complementar os resultados obtidos. De forma geral, a sonda foi a uma profundidade entre 5 a 7 m. A partir dos

resultados obtidos com o uso do MIP, foi possível agrupar centros de massas distintos e identificar cinco *hotspots*, incluindo uma área com presença de LNAPL, que não tinha sido identificado a partir das investigações tradicionais. A detecção e delimitação da extensão da contaminação, de forma rápida e precisa, são primordiais, principalmente devido ao fato de o LNAPL ser uma fonte de contaminação secundária, que, quando não identificada, permanece contaminando grandes volumes de solo e água subterrânea por longos períodos. Além disso, foi identificada uma migração *off-site* da contaminação de grande preocupação ambiental, em razão da presença de um canal que, além de ser um bem a se proteger, desagua na Baía de Guanabara (MILANI, 2021).

Curry *et.al.* (2016) apresenta um estudo de caso para caracterização inteligente (*smart characterization*) com aplicação de métodos de caracterização de local de alta resolução para encontrar o fluxo de massa do contaminante, integrando mapeamento de permeabilidade relativa, interpretação clássica de hidroestratigrafia e amostragem de água subterrânea de alta densidade e solo saturado. Um dos principais SQIs abordados no estudo de caso é o composto 1,4-dioxano, esse composto não é detectado diretamente por sonda MIP (hidrocarbonetos e solventes clorados em zonas de armazenamento), com resoluções disponíveis na realização do estudo de caso. Nessa forma a abordagem inteligente recomendada envolve a aplicação de laboratórios móveis especializados em alta capacidade ou de rápida recuperação usando laboratórios fixos comerciais.

Ao contrário dos métodos de triagem qualitativos, que são difíceis de calibrar com dados quantitativos e, portanto, de utilidade limitada como base para a tomada de decisões remotas, a aplicação da abordagem do laboratório móvel no contexto da comparação assistemática com a análise de laboratório fixa permite avaliar se os dados precisam ser corrigidos, com base nas diferenças entre os métodos analíticos e na influência dos resultados da extração nos resultados da amostragem. De toda forma, sondas com a inclusão do sistema HPT, em conjunto com os resultados qualitativos, podem ser utilizadas para o mapeamento de alta densidade e a visualização 3D de massa da fonte em relação às zonas de transporte, ao armazenamento da fonte e da pluma de degradação que permite que se avalie quantitativamente se a “fonte primária/secundária” são fontes contínuas e significativas para atingir a massa relevante ao desenvolver estratégias de remediação (CURRY *et.al.*, 2016).

Fjordbøge *et. al.* (2017) realizou investigações de campo para determinar a ocorrência de tetracloroetano (PCE), um líquido de fase livre não aquosa densa (DNAPL, do inglês *Dense Non-Aqueous Phase Liquid*), bem como a formação da zona de fonte e a integridade do aquífero em um site com liberação de DNAPL por 30 a 50 anos.

A zona fonte da DNAPL estava localizada em uma camada de argila sobre um aquífero de calcário. A formação da zona fonte do DNAPL foi investigada por meio de uma abordagem de várias linhas de evidência usando várias ferramentas de caracterização, dentre elas o uso da sonda MIP. A combinação mais favorável de ferramentas para a caracterização de DNAPL foram investigações geofísicas, a sonda MIP com o sistema HPT, a subamostragem de perfil com quantificação de solventes clorados e o teste de corante hidrofóbico com *Sudan IV*, com o *Flexible Liner Underground Technologies* (FLUTe) e o NAPL que se envolve com *activated carbon felt* (FACT). Enquanto a ocorrência de DNAPL foi mais bem determinada pela quantificação de solventes clorados em amostras de solo apoiada pelos testes de corante hidrofóbico (*Sudan IV* e NAPL FLUTe), o entendimento do modelo conceitual da formação da zona fonte foi amplamente auxiliado pelas ferramentas de caracterização por *direct-push* (FJORDBØGE *et. al.*, 2017).

Nenhuma técnica de forma isolada foi suficiente para a caracterização da formação da zona fonte de DNAPL. No entanto, o uso do MIP, como uma ferramenta de varredura inicial qualitativa contínua, colaborou fortemente para a compreensão da formação da zona fonte na argila até aquitarde, de forma combinada com NAPL FLUTe e FACT, bem como a coleta de testemunhos com análise de subamostra quantitativa para estabelecimento de concentrações limiares de DNAPL e *Sudan IV* testes de colorização para confirmação positiva da presença de DNAPL. Com a combinação dessas técnicas, foi possível observar a migração vertical de DNAPL através do aquitarde reduzido. Ela foi observada apenas onde a camada de argila era reduzida em menos de 2 m de espessura, o que é consistente com os estudos geológicos em áreas de alto risco para o desenvolvimento de fratura ao longo da argila até o aquitarde (FJORDBØGE *et al.*, 2017).

Mousavi *et al.* (2020) conduziu um estudo com série de testes com o sistema MiHPT (MIP com HPT) para investigar as características de aterro moderno de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Nebraska. Um aterro RSU é um recurso de energia renovável para produzir uma quantidade significativa de calor e metano usados para gerar eletricidade.

Três séries de testes de sondagem com o sistema MiHPT foram conduzidos no campus leste da Universidade Nebraska-Lincoln (UNL) e no aterro Butler County, Nebraska, usando um aparelho MiHPT para preparar o perfil para temperatura de resíduos, concentração de VOC, condutividade elétrica, pressão hidráulica e estimativas de condutividade hidráulica (MOUSAVI *et. al.*, 2020).

Os resultados mostram uma diferença clara dos valores entre um material subsuperficial de argila siltosa regular (no campus leste da UNL) e aterro de RSU (no aterro sanitário Butler).

Os resultados do aterro mostraram uma maior concentração de metano nas camadas superiores de um aterro. Além disso, a pressão hidráulica e a condutividade elétrica do RSU mostraram forte relação com a profundidade. Isso pode mostrar como as profundidades mais baixas têm a decomposição do material densificado devido à biodegradação. Maior pressão hidráulica foi observada em camadas profundas com temperaturas mais altas (MOUSAVI *et. al.*, 2020).

Mousavi, Feng e McCann (2021) conduziram uma série de testes com uma sonda MIP e uma sonda HPT para investigar as características de aterros de resíduos sólidos municipais (MSW, do inglês *municipal solid waste*), e de aterros sanitários ativos e fechados.

As sondagens de MIP e HPT foram realizadas em um aterro ativo denominado Butler County (com recirculação de lixiviado) e um aterro fechado denominado Sarpy County, ambos em Nebraska. As sondagens foram realizadas com o objetivo de desenvolver um perfil vertical para temperatura de resíduos sólidos municipais, concentração relativa de VOC, condutividade elétrica, pressão hidráulica e condutividade hidráulica estimada (MOUSAVI; FENG; MCCANN, 2021).

Os resultados das sondagens do MIP mostraram a presença de concentração máxima de gás metano apenas abaixo da camada de cobertura superior do aterro sanitário ativo, enquanto a concentração máxima de metano no aterro sanitário fechado foi encontrada em várias camadas em profundidade média. Os testes também mostraram uma maior quantidade de outros VOCs no aterro fechado, o que indicou um maior processo de decomposição ao longo dos anos. O MIP também mediu a temperatura enquanto avançava pelas camadas dos MSW, e os resultados mostraram que o aterro ativo teve uma tendência de aumento da temperatura começando em torno da temperatura ambiente até cerca de 60 °C, a 16 m de profundidade. Os resultados no aterro fechado também mostraram um aumento gradativo da temperatura, mas apenas até cerca de 28°C, um indicativo de que o aterro não atingiu a biodegradação completa da matéria orgânica (MOUSAVI; FENG; MCCANN, 2021).

Mousavi, Feng e McCann (2021) também mediram a pressão hidráulica e a condutividade elétrica dos MSW ao longo da profundidade do perfil. A pressão hidráulica e, consequentemente, a condutividade hidráulica aumentaram em profundidades menores, o que indicou a presença de materiais densificados em profundidades mais rasas, devido à maior tensão vertical e degradação do material por conta da biodegradação. As pressões foram maiores no aterro fechado, onde já não havia sido constatado um processo de biodegradação avançado, confirmando a hipótese.

Por fim, os resultados das medições de condutividade elétrica (EC, do inglês *electric conductivity*) também mostraram mudanças significativas com a profundidade e a idade dos

resíduos. As profundidades mais baixas no condado de Butler e no condado de Sarpy mostraram valores médios de EC geralmente mais altos em profundidades mais baixas, o que coincidiu com a temperatura mais alta e o contato da área de superfície com o sensor de EC. No entanto, a idade mais avançada do resíduo apresentou claramente um EC menor, que estava relacionado à decomposição de ácidos orgânicos (MOUSAVI; FENG; MCCANN, 2021). Assim, Mousavi, Feng e McCann (2021) mostraram que o uso das ferramentas de detecção direta por *direct-push* MIP e HPT pode ser um aparelho de teste *in situ* com boa relação custo-benefício, prático e confiável, para mensurar as mudanças de variáveis (VOCs, Metano, Pressão, EC) em perfil de um site heterogêneo, para avaliar a atividade de um aterro sanitário de MSW.

Nivorlis *et al.* (2019) apresenta um estudo no qual a sonda MIP é utilizada para medição direta das concentrações de contaminantes em conjunto com dois outros métodos diferentes, são eles: tomografia de refração sísmica para investigar a profundidade da interface do leito rochoso; a resistividade de corrente direta; e a tomografia de polarização induzida no domínio do tempo para adquirir uma imagem de alta resolução das propriedades elétricas da subsuperfície. Neste trabalho é apresentado os resultados de uma metodologia aplicada em um local contaminado com solventes clorados para caracterização da contaminação, a fim de planejar a remediação e acompanhar a etapa inicial de remediação *in situ* de forma eficiente.

Os resultados do método MIP foram analisados para criar um modelo conceitual simplificado para a área de interesse e os dados geofísicos foram usados para expandir esse modelo. A formação da pluma DNAPL pode ser explicada pela imersão no leito da rocha (camada impermeável) e pelo fluxo de água subterrânea. Com base na topografia do leito rochoso e na direção do fluxo do lençol freático, não esperamos que o contaminante tenha migrado em caminhos diferentes, além de, possivelmente, em fraturas do leito rochoso abaixo da superfície rochosa (NIVORLIS *et al.*, 2019).

O objetivo do estudo foi melhorar o entendimento sobre o sistema hidrogeológico subterrâneo, investigar a distribuição do contaminante e seu efeito na resposta geofísica e identificar mudanças temporais no sinal geofísico logo após a remediação iniciada. O método utilizado no estudo forneceu informações qualitativas sobre o contaminante e os produtos de degradação, de maneira que até o contaminante possa ser identificado na campanha *baseline* de amostragem. O autor espera que o monitoramento do site mostre resultados promissores, uma vez que já pode se observar mudanças, para o entendimento dos impactos da remediação *in situ* de solventes clorados, bem como para apontar onde as amostras reais precisam ser coletadas para verificar mudanças no subsolo (NIVORLIS *et al.*, 2019).

Schneider *et al.* (2020) conduz um estudo usando as sondas MIP para delinear perfis qualitativos de contaminantes apresentados e a sonda HPT para definir perfis litológicos correlacionados com condutividade elétrica (EC), além de estimativas de velocidade com base em perfis de permeabilidade medidos com uma ferramenta. Esse estudo avalia o uso de um perfilador passivo de alta resolução (HRPP, do inglês *High-Resolution Passive Profiler*) de acionamento direto, com o objetivo de quantificar e delinear as concentrações de compostos orgânicos voláteis clorados (CVOCs), indicadores geoquímicos e micro-organismos/genes degradadores de CVOC, bem como para realizar análise de isótopos estáveis específicos do composto CSIA (do inglês *compound-specific stable isotope analysis*) de CVOCs e velocidade intersticial estimada em < 30 cm de resolução.

O HRPP foi testado em campo em uma zona de fonte de fase livre não aquosa densa (DNAPL) na antiga Estação Aérea Naval em Alameda, CA. Os conjuntos de dados HRPP foram comparados aos seguintes conjuntos de dados tradicionais de água subterrânea: CVOC e concentrações de ânions em amostras de água de poço de monitoramento padrão e de multinível, concentrações de CVOC em amostras de solo, perfis qualitativos de contaminantes delineados com uma sonda MIP, comunidade microbiana e CSIA perfis de Bio-Traps implantados em poços, velocidade da água subterrânea de medidores de fluxo passivos (PFMs), perfis litológicos correlacionados com condutividade elétrica MIP (EC) e estimativas de velocidade com base em perfis de permeabilidade medidos pela sonda HPT (SCHNEIDER *et al.*, 2020).

Em alguns casos, os dados do HRPP eram equivalentes às técnicas tradicionais e, em outros casos, os dados do HRPP eram mais representativos da variabilidade local do que das condições do aquífero em massa. No geral, os resultados apoiam o uso do HRPP para fornecer dados de alta resolução sobre concentrações, velocidade e atividade microbiana em implantações temporárias *direct push* sem instalação de poço, fornecendo uma nova ferramenta para avaliar melhor as áreas fontes e plumas de água subterrânea contaminada, mesmo os que estão em meios de baixa permeabilidade, e os que agem para aumentar a fidelidade dos modelos de transporte do site (SCHNEIDER *et al.*, 2020).

Netto *et al.* (2020) apresenta uma modelagem 3D dos métodos geofísicos de tomografia elétrica e radar de penetração no solo (GPR) associados a um método invasivo, a sonda de interface de membrana (MIP) na delimitação da pluma de contaminação por creosoto em uma área localizada próxima ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), que abrigava uma antiga ferrovia e o material contaminante era utilizado no tratamento de dormentes de madeira sem os devidos cuidados ambientais. O creosoto é um poluente orgânico

é amplamente utilizado na preservação de madeira. O modelo 3D gerado pelos dados geofísicos foi interpretado considerando as informações pontuais do levantamento MIP, que teve o intuito de refinar os valores de resistividade elétrica no subsolo. Todo o modelo interpretado foi confirmado pela coleta de amostras de águas subterrâneas da área, garantindo a eficácia da associação dos métodos para investigação detalhada.

5.7 Investigação por *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampler (HPT- GWS)*

A sonda HPT-GWS (Figura 6) foi projetada com várias portas para permitir a amostragem em profundidades almejadas em zonas permeáveis de uma formação não consolidada, à medida que a sonda avança.

Figura 6 – Sonda *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampler (HPT- GWS)*



Fonte: adaptado de Geoprobe (2017).

Para facilitar a amostragem, uma linha de amostra separada e substituível é conectada à sonda. Além disso, o aumento do número de portas com tela (20 cm) fornece mais área de superfície com tela e melhor rendimento de água subterrânea de formações permeáveis.

A operação da sonda HPT- GWS, segue o seguinte procedimento:

Etapa (i) – Enquanto a sonda avança, o operador injeta água deionizada, que possui valores de condutividade específicos muito baixos. Dessa forma, um registro de pressão de injeção é criado e o operador pode observar profundidades abaixo do nível do lençol freático conhecido, onde há pressão de injeção muito baixa e, portanto, uma zona de alta permeabilidade.

Etapa (ii) – Para coletar uma amostra de água subterrânea, o avanço da sonda é interrompido, o *software* de aquisição DI será alterado do gráfico de profundidade para o gráfico de tempo e um teste de dissipação será iniciado. Para isso, o operador desligará a bomba HPT e o atuador mecânico pode ser colocado no topo das hastes.

Etapa (iii) – Depois de montar a tubulação de amostragem de água subterrânea dentro do atuador, o mesmo pode ser iniciado. A água acabará sendo retirada do tubo de amostra e, em seguida, o usuário pode monitorar os valores de condutância específicos da água. Inicialmente, a água DI usada para injetar mostrará uma condutância específica muito baixa. À medida que mais água de formação atinge a superfície, os valores de condutância específica aumentam e, eventualmente, se estabilizam. Neste ponto, o operador pode ter certeza de que a água subterrânea da formação será amostrada (GEOPROBE, 2016).

McCall e Christy (2020) avaliaram o uso da HPT-GWS como ferramenta de perfilamento hidráulico-amostrador de água subterrânea como um indicador da qualidade da água (nível de espécies iônicas dissolvidas) em um aquífero aluvial. Como o sistema fornece registros de pressão de injeção (Pc) e registros de condutividade elétrica (EC), a água subterrânea pode ser amostrada em várias profundidades conforme a sonda avança em subsuperfície (perfilagem). Foi observado que, quando a pressão corrigida HPT (Pc) indica uma unidade de aquífero consistente, logo a EC pode ser usada como um indicador da qualidade da água.

O estudo concluiu que a aplicação dos métodos de campo e dos métodos de análise de dados descritos podem ser úteis para muitas investigações hidrogeológicas, da qualidade de água subterrânea/contaminantes. Os resultados da amostra para elementos de ocorrência natural em nível de traço (Arsênio, Bário e Urânio) demonstram ainda mais a eficiência do uso deste sistema para amostrar a contaminação em baixos níveis em águas subterrâneas. Além disso, o estudo também recomenda pesquisas adicionais com perfis de EC e os perfis da pressão corrigida (Pc), juntamente com a aplicação da Lei de Archie, que podem ser úteis para ajudar a determinar a presença de fase líquida não aquosa (NAPL) em formações não consolidadas.

Dutta *et al.* (2021) relata o desenvolvimento e a aplicação de duas novas tecnologias, uma sonda de 1,75 polegadas HTP-GWS e uma sonda OIP com uma sonda HPT acoplada, chamado de sistema OIHP (do inglês, *Optical Image Hydraulic Probe Tool*). Um extenso trabalho de campo foi realizado em um site contaminado com cromo VI (Cr VI) em águas subterrâneas. Uma investigação preliminar foi realizada com a ferramenta de perfilagem OIHPT para determinar a litologia da formação do site e a permeabilidade relativa para

identificar potenciais intervalos de amostragem de água subterrânea e vias de migração de contaminantes na subsuperfície.

Após o uso do sistema OIHPT com o modelo conceitual do site mais refinado em relação a hidrostratigrafia e permeabilidade de formação, para melhor compreender as potenciais vias de migração de contaminantes, uma investigação de campo com o sistema HPT-GWS foi realizada de maneira eficaz na determinação da distribuição e das concentrações de Cr (VI) na água subterrânea. O perfil e a análise local da água subterrânea forneceram não apenas a concentração de contaminantes, mas também informações espaciais sobre sua distribuição na matriz de formação. No site investigado, a presença de zonas de baixa permeabilidade na formação contribuiu para a distribuição espacial heterogênea da contaminação por Cr (VI). O autor acredita que as informações provenientes desse estudo ajudarão a compreender melhor a contaminação por Cr (VI) em águas subterrâneas para o desenvolvimento de planos de investigação detalhada para a remediação de sites (DUTTA *et al.*, 2021).

5.8 Investigação por *Optical Image Profiler* (OIP)

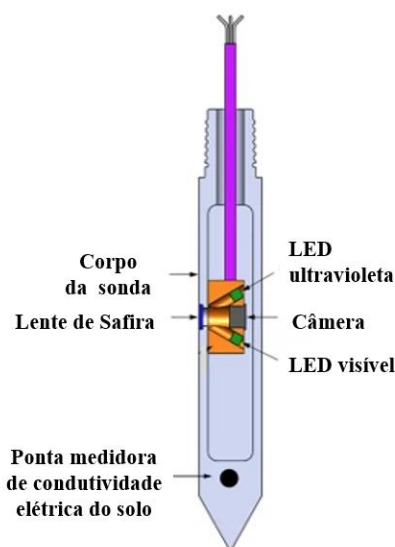
A sonda OIP é uma ferramenta de alta resolução que utiliza uma fonte de luz e uma câmera *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS) para investigar contaminantes fluorescentes por meio de uma lente de safira na lateral da sonda. O sistema OIP está disponível em duas versões, o sistema OIP-UV para delinear combustíveis e óleos de hidrocarbonetos de fase líquida não aquosa (NAPL, do inglês *Non-aqueous Phase Liquid*) e o sistema OIP-G para delinear alcatrão de carvão, creosoto e combustíveis de porão (bunker) (GEOPROBE, 2017).

O sistema OIP-UV utiliza um diodo emissor de luz ultravioleta (UV) de 275 nm (LED) para produzir fluorescência a partir dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) contidos nos combustíveis e óleos leves. A luz ultravioleta é direcionada para fora de uma janela de safira na lateral da sonda (Figura 7) para o solo. Essa ferramenta é usada principalmente para mapear líquidos de fase não aquosa leve (LNAPL), ou seja, o LNAPL residual e óleos leves (GEOPROBE, 2017).

A presença de combustíveis de petróleo em fase livre na subsuperfície (frequentemente chamados de líquidos de fase não aquosa leve – LNAPL) é um perigo em quase todas as cidades do mundo moderno. O vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo, a contaminação e os riscos resultantes têm se mostrado um desafio para investigar e remediar. Uma questão é caracterizar adequadamente a presença e extensão espacial de LNAPLs na subsuperfície. A experiência tem mostrado que os métodos convencionais de testemunhagem de solo e métodos

de monitoramento de água subterrânea estão repletos de limitações que podem levar a erros significativos na estimativa da quantidade e distribuição espacial de LNAPLs no subsolo. As imagens de fluorescência de combustível induzida por UV fornecem não apenas a confirmação de que LNAPLs estão presentes, mas também informações visuais não disponíveis anteriormente sobre a distribuição e comportamento de LNAPLs na matriz de formação (MCCALL *et al.*, 2018).

Figura 7 – Sonda *Optical Image Profile – UV*.



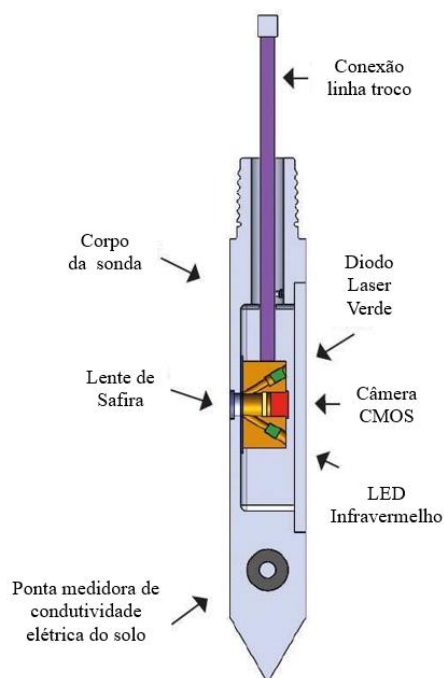
Fonte: adaptado de Geoprobe (2017).

À medida que a sonda avança para a subsuperfície, a fonte de luz ultravioleta induz a fluorescência dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs, do inglês *Polycyclic aromatic hydrocarbon*) do combustível. Esta fluorescência é capturada por uma câmera interna que opera a 30 imagens por segundo, mas apenas uma imagem é salva no arquivo de registro para cada 15 mm (0,05 pés) de profundidade de registro. As imagens são salvas durante o avanço do registro e as fotos são tiradas usando fontes de luz ultravioleta e são visíveis em cada adição de haste, bem como nas profundidades escolhidas pelo operador. As imagens de fluorescência do solo (60 por metro) são salvas em todo o registro e podem ser revisadas no *Direct Image Viewer* após a conclusão do registro (GEOPROBE, 2017).

A sonda *OIP-G* utiliza um diodo emissor de luz de comprimento de onda verde (525nm). Essa sonda foi desenvolvida, pois diversos contaminantes orgânicos comuns de preocupação (alcatrões de carvão, creosoto, combustíveis de bunker) produzem resultados inconsistentes sob luz ultravioleta, mas apresentam fluorescência sob luz de comprimento de onda verde. Assim

como o OIP-UV, a sonda *OIP-G* também possui uma ponta medidora de condutividade elétrica do solo (Figura 8).

Figura 8 – Sonda *Optical Image Profile – G*.



Fonte: adaptado de Geoprobe (2017).

Assim como a sonda OIP-UV, a sonda OIP-G inclui uma matriz de condutividade elétrica dipolo (EC) para a medição de EC de formação em massa. Os registros de EC e % AF (percentual de área fluorescente) são exibidos na tela junto com as imagens de fluorescência conforme a sonda avança.

McCall *et al.* (2018) avaliaram o uso da sonda e o sistema OIP como uma nova ferramenta e nova tecnologia para auxiliar na definição da presença e distribuição de combustíveis em fase líquida não aquosa, ou seja, em materiais não consolidados. Durante a avaliação, foi realizado um teste de bancada usando gasolina comum sem chumbo disponível comercialmente, óleo diesel rodoviário e óleo bruto Bemidji para avaliar o desempenho do sistema OIP-UV para detectar LNAPLs de petróleo sob condições quase ideais. Os resultados do teste de bancada confirmam que o sistema OIP deve ser uma ferramenta eficaz para a detecção de muitos fluidos de petróleo no subsolo. Além disso, uma investigação de campo com o uso do OIP também foi realizada.

Os resultados dos perfis do OIP foram comparados com perfis fornecidos por outra ferramenta de investigação de alta resolução, UVOST e PID, em testemunhos contínuos de

solo, além da classificação visual-manual do solo. Os resultados demonstraram boa correlação entre os métodos. No entanto, a vantagem do registro OIP é que nenhuma amostra precisa ser coletada para obter-se a % AF (percentual de área fluorescente), ou seja, não há a necessidade de coleta de testemunhos do solo para se obter a porcentagem AF do solo. Isso não apenas reduz o nível físico de esforço da investigação, mas também reduz o potencial de exposição do trabalhador a contaminantes perigosos, além de reduzir o custo de lidar com os resíduos derivados da investigação. Em resumo, a sonda OIP por *direct push* é uma ferramenta útil em muitos sites com LNAPLs de petróleo comuns, em materiais não consolidados, para caracterização de alta resolução (MCCALL *et al.*, 2018).

Dutta *et al.* (2021) relata o uso do sistema OIHPT em uma investigação ambiental realizada em um site para obter registros de condutividade elétrica (EC) simultaneamente com registros de pressão de injeção HPT conforme a sonda avança nas formações não consolidadas com métodos de *direct push*. As imagens capturadas pelo sistema OIHPT com textura e cor da formação durante o registro de luz visível podem ajudar na definição de litologia e reduzir a necessidade de amostragem de testemunho. Os registros de injeção de pressão HPT também forneceram informações úteis sobre hidroestratigrafia e permeabilidade de formação para melhor compreender as potenciais vias de migração de contaminantes.

Segundo o autor, neste projeto de campo resultou na identificação da distribuição 3-D do contaminante de metal pesado (CrVI) espacialmente na matriz de formação de água subterrânea pela primeira vez na literatura e na indústria geoambiental. Os dados de concentração produziram um valor AIC de -35,6 e -27,4 para cromo total e hexavalente, respectivamente. O valor AIC ou o Critério de Informação de Akaike (do inglês, *Akaike's Information Criterion*) é uma abordagem estatística comumente usada, também é empregada para comparar as concentrações de CrVI obtidas a partir do dispositivo de varredura de campo e dos resultados dos testes de laboratório. Assim, demonstrando claramente que os resultados de campo se comparam bem com os resultados de laboratório. Os dados de contaminantes obtidos por este dispositivo de varredura de campo incorporado com registros dos perfis de pressão HPT podem ajudar a prever e identificar a direção do fluxo do contaminante, as zonas permeáveis potenciais que atendem ao fluxo e os locais adequados para instalação de poços. Isso ajudará no desenvolvimento de modelos conceituais de sites de alta resolução para o gerenciamento desses sites e na otimização do processo de remediação (DUTTA *et al.*, 2021).

Dietmann *et al.* (2020) apresenta um estudo com a sonda OIP e é usada para rastrear *in situ* partículas fluorescentes injetadas no subsolo. Neste estudo, o objetivo principal foi o desenvolvimento de partículas diretamente rastreáveis por meio da combinação de fluoresceína

com Hidróxidos Duplos em Camadas (LDHs, do inglês *Layered Double Hydroxides*). Neste estudo também é apresentado a síntese fácil e facilmente ajustável de LDHs fluorescentes (Fluo-LDH) via co-precipitação em condições de supersaturação. Sua capacidade de simular tamanhos de partículas de LDHs reativos previamente estudados, que provaram ser capazes de adsorver ou degradar solventes orgânicos clorados de soluções aquosas também foi investigada. Testes usando um *Optical Image Profiler* (OIP) confirmaram que os LDHs fluorescentes podem ser facilmente detectados com esta ferramenta. Mesmo LDHs com menores quantidade de corante fluorescente foram detectáveis

Juntamente com o uso de um OIP, que é capaz de excitar o material fluorescente e coletar imagens em tempo real, isso pode fornecer um método novo, eficiente e de baixo custo para o rastreamento *in situ* de partículas injetadas no subsolo (DIETMANN *et al.*, 2020).

5.9 Abordagem Tríade e a HRSC

O *Triad Approach* (Abordagem Tríade) para a tomada de decisão em sites com passivos ambientais perigosos oferece uma metodologia tecnicamente defensável para gerenciar a incerteza de decisão que alavanca ferramentas e estratégias de caracterização inovadoras (USEPA, 2010), publicada sob a forma do Guia de Implementação Tríade (ITRC, 2003). É um conjunto de três estratégias para o gerenciamento de áreas contaminadas (AC) (Figura 9).

Figura 9 – Abordagem Tríade



Fonte: TRIAD Resource Center: Triad: A Smarter Solution to Site Cleanup. Triad: A Smarter Solution to Site Cleanup. [N.I.]. Disponível em: <https://triadcentral.clu-in.org/index.cfm>. Acesso em: 01 nov. 2021.

- **Planejamento sistemático** (*Systematic Planning*): é um processo de planejamento que estabelece uma base cientificamente defensável para as atividades propostas no projeto. O planejamento sistemático geralmente inclui a identificação das principais decisões

a serem feitas, o desenvolvimento de um modelo conceitual de site (CSM) para apoiar a tomada de decisão e uma avaliação da incerteza de decisão junto com abordagens para gerenciar essa dúvida no contexto do modelo conceitual de site. O planejamento sistemático é importante para o sucesso de todos os projetos de sites com passivos ambientais perigosos, quer a Abordagem Tríade seja adotada ou não. No entanto, é particularmente crítico para a Abordagem Tríade que o uso de tecnologias de medição em tempo real permita que o CSM evolua e amadureça conforme o trabalho de campo está em andamento (USEPA, 2010).

- **Estratégias dinâmicas de trabalho** (*Dynamic Work Strategies*): são estratégias de trabalho para caracterização, remediação e monitoramento de sites contaminados que incorporam a flexibilidade de mudar ou se adaptar às informações geradas por tecnologias de medição em tempo real. Conforme as informações são coletadas, elas são usadas para tomar decisões sobre quais atividades subsequentes irão resolver melhor os dados restantes e as incertezas de decisão e/ou atender às metas de remediação. As estratégias de trabalho dinâmicas são geralmente documentadas como lógica de decisão pré-aprovada em documentos de planejamento apropriados (USEPA, 2010).

- **Tecnologias de medição em tempo real** (*Real-Time Measurements*): referem-se a qualquer mecanismo de geração de dados que apoie a tomada de decisão em tempo real, ou seja, forneça informações em um período suficiente para viabilizar as estratégias dinâmicas de trabalho. As tecnologias de medição em tempo real entregam os resultados com rapidez suficiente para influenciar o progresso da coleta de dados e das atividades de campo (USEPA, 2010).

A HRSC é uma estratégia que faz parte da abordagem de tecnologias de medição em tempo real, cujo objetivo é gerenciar as incertezas do MCA, aumentando a confiança de que as decisões do projeto, relacionadas à presença de contaminantes, localização, destino, exposição e opções para redução do risco, sejam tomadas de forma correta, buscando soluções economicamente viáveis e efetivas (USEPA, 2004). De acordo com o Guia de Implementação da Tríade (ITRC, 2003), essa abordagem trabalha com dados chamados de “segunda geração”. Esses dados são compostos por um número significativo de amostras de baixo custo, capazes de guiar a seleção de poucas amostras de custo mais elevado. O número de amostras de baixo custo deve ser proporcional à heterogeneidade do meio.

5.10 Análise das técnicas de investigação com o uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push*

5.10.1 Comparação de técnicas de investigação de alta resolução nas classes de contaminantes

A seleção da técnica de investigação de alta resolução depende das condições físicas do site, como litologia, e das substâncias químicas de interesse (SQIs). As funções e dados alvos de cada técnica HRSC foram resumidas e são apresentadas no Quadro 1, que devem ser levadas em consideração durante o planejamento da investigação.

Quadro 1 – Resumo das funções e dados alvos das técnicas de HRSC com uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push* nesse trabalho.

Ferramenta	Função	Dados alvos
MIP <i>Membrane Interface Probe</i>	<ul style="list-style-type: none"> Determinar massa residual de contaminantes no solo. 	<ul style="list-style-type: none"> VOCs em zonas saturadas e vadosas; Alguns SVOCs em zonas saturadas e vadosas; Alguns compostos halogenados em zonas saturadas e vadosas; Condutividade elétrica.
HPT <i>Hydraulic Profiling Tool</i>	<ul style="list-style-type: none"> Definir as mudanças litológicas e o perfil hidroestratigráfico. 	<ul style="list-style-type: none"> Perfil hidroestratigráfico contínuo para definir vias de migração de contaminantes; Condutividade elétrica.
HPT-GWS <i>Hydraulic Profiling Tool – GroundWater Sampling</i>	<ul style="list-style-type: none"> Definir as mudanças litológicas e o perfil hidroestratigráfico; HPT combinado, amostrador discreto de água subterrânea. 	<ul style="list-style-type: none"> Perfil hidroestratigráfico contínuo para definir vias de migração de contaminantes; Amostragem das vias de migração de contaminantes; Condutividade elétrica.
OIP <i>Optical image profiler</i>	<ul style="list-style-type: none"> Delinear combustíveis e óleos de hidrocarbonetos de fase líquida não aquosa (NAPL). 	<ul style="list-style-type: none"> Fase líquida não aquosa (NAPL); Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs); OIP-UV: Diesel, gasolina, querosene e óleos combustíveis leves; OIP-G: Alcatrão (<i>coal tar</i>), creosoto e óleos combustíveis pesados.

Fonte: Elaboração própria.

O quadro 2 apresenta um resumo dos tipos de contaminantes alvos e os tipos de fases das técnicas de HRSC com as sondas nesse trabalho.

Quadro 2 – Resumo dos tipos de contaminantes alvos das técnicas de HRSC com as ferramentas de detecção direta por *direct-push* nesse trabalho.

Tipo de fase	Matriz	SQI	Ferramenta	OBS.:
Produto imiscível /NAPL	Solo e/ou Água subterrânea	PAHs – cadeia leve	OIP-UV	
		PAHs – cadeia pesada; cresoto; alcatrão	OIP-G	
		Solventes Clorados	MiHpt	<ul style="list-style-type: none"> Em água subterrânea pode ser usado a HPT-GWS para amostragem em camadas litológicas mais condutíveis.
Fase dissolvida	Solo	Hidrocarbonetos de Petróleo	MiHpt	
		Solventes Clorados	MiHpt	
	Água subterrânea	PAHs	MiHpt	<ul style="list-style-type: none"> Não é eficiente para delinear fase dissolvida em baixas concentrações.
			HPT-GWS	<ul style="list-style-type: none"> Em água subterrânea pode ser usado a HPT-GWS para amostragem em camadas litológicas mais condutíveis.
		Solventes Clorados	MiHpt	<ul style="list-style-type: none"> Não é eficiente para delinear fase dissolvida em baixas concentrações.
			HPT-GWS	<ul style="list-style-type: none"> Em água subterrânea pode ser usado a HPT-GWS para amostragem em camadas litológicas mais condutíveis.
		Outros contaminantes	HPT-GWS	<ul style="list-style-type: none"> Em água subterrânea pode ser usado a HPT-GWS para amostragem em camadas litológicas mais condutíveis;

Fonte: Elaboração própria.

5.10.2 Vantagens e desvantagens das técnicas de investigação de alta resolução

De acordo com a EPA (2018), o uso das tecnologias de investigação de alta resolução (HRSC) com sonda por *direct push* geralmente são limitadas a materiais não consolidados com profundidades de menos de 30,5 metros. Assim, essas ferramentas devem ser usadas para penetrar em camadas de rocha, bases ou fundações de concreto espessas (maior que 30 cm) ou outras barreiras de alta densidade.

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens das técnicas de HRSC com uso de ferramentas de detecção direta por *direct-push* nesse trabalho.

Ferramenta	Vantagens	Limitações
MIP	<ul style="list-style-type: none"> Dados verticalmente contínuos em tempo real sobre distribuições de VOC e condutividade elétrica do solo; Pode tipicamente completar 45 a 76 metros lineares de exploração por dia; Ideal para localizar áreas fontes e núcleos de pluma. 	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldade em penetrar em solos com baixa permeabilidade e cascalho; Geralmente não faz distinção entre analitos; Funciona somente em matrizes não consolidadas.
HPT	<ul style="list-style-type: none"> Fornecer perfis contínuos em tempo real das propriedades hidráulicas do solo para matrizes finas e de granulação grossa; Localizar e definir vias de migração preferenciais para contaminantes no subsolo; Selecionar eficientemente intervalos para filtro de poço; Pode ser acoplado a outras ferramentas de HRSC, como MIP e OIP. 	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldade em penetrar em solos com baixa permeabilidade e cascalho; Produtividade baixa em solos argilosos.
HPT-GWS	<ul style="list-style-type: none"> Permite a coleta de água subterrânea em solos e sedimentos não consolidados, em intervalos discretos ao longo da mesma sondagem. 	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldade de coletar água em solos com baixa permeabilidade.
OIP	<ul style="list-style-type: none"> Possibilita detecção de fase livre. Capaz de capturar automaticamente e manualmente imagens visíveis do solo. Possibilita verificar falso positivos por meio de fotos da câmera. 	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldade em penetrar em solos com baixa permeabilidade e cascalho.

Fonte: adaptado de (BARBER; DYMENT; PITKIN, 2014)

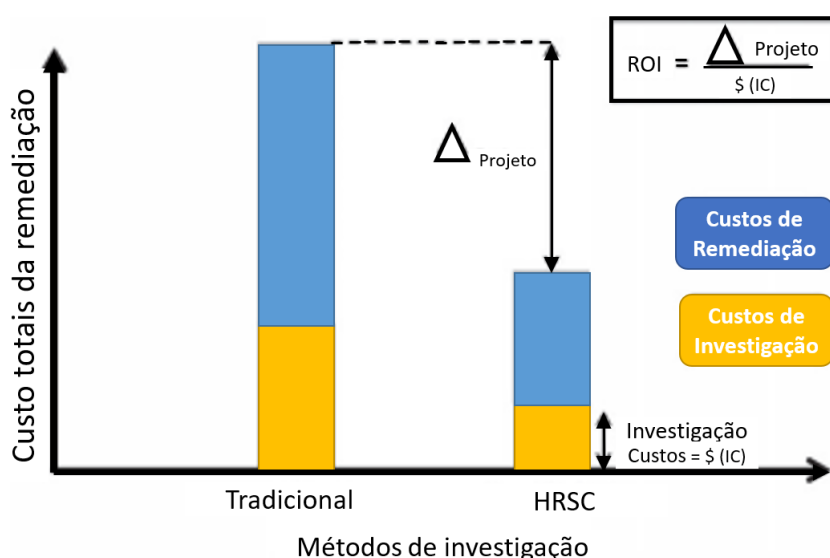
Grandes mudanças na densidade entre as camadas estratigráficas também podem limitar o uso dessas tecnologias. A presença de camadas moles sobrepostas a camadas duras pode causar alteração no alinhamento da sonda e, em última instância, entortar ou quebrar a haste (EPA, 2018).

Em relação às SQIs, cada técnica HRSC apresenta vantagens e desvantagens, resumidas na Quadro 3, que devem ser levadas em consideração durante a seleção para determinado caso.

5.10.3 Avaliação do custo-benefício

De acordo com Suthersan, Quinnan e Welty (2015), quando métodos de amostragem de alta resolução são aplicados na escala de investigação adequada, nas zonas de transporte e armazenamento, eles permitem entender a maturidade da pluma. Isso ajuda a reduzir significativamente os custos de remediação do ciclo de vida em sites complexos, e o retorno da investigação (ROI) pode ser maior do que o esperado. O ROI pode ser definido como a economia total do projeto pelo custo de investigação aplicado (Figura 7). O autor apresenta que cada dólar gasto em técnicas de definição de fluxo de massa, pode levar a um ROI de três a cinco vezes — ou até maior —, em termos de redução no custo geral de remediação de plumas de águas subterrâneas contaminadas.

Figura 10 – Economia geral de custos utilizando métodos de HRSC e desenvolvimento de melhores MCA para remediar plumas de águas subterrâneas contaminada.



Fonte: Adaptado de Suthersan, Quinnan e Welty (2015) (2015).

Para maximizar o ROI derivado dos HRSC, as partes interessadas precisam ir além da estrutura das abordagens tradicionais de investigação de local e se concentrar no desenvolvimento de CSMs baseados em fluxo quantitativo (SUTHERSAN, QUINNAN, WELTY, 2015).

Durante o estudo de caso em uma planta industrial localizada no município de Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro, feito em 2017, Milani (2021) apresenta um custo de investigação com o uso do MIP, referente ao aluguel do equipamento e equipe de operação de aproximadamente R\$ 20.000,00 por dia — considerando a cotação do dólar na data: U\$ 1 (dólar americano) = R\$ 3,126 (real). Os resultados obtidos foram determinantes para se obter um modelo conceitual mais representativo da área de interesse. Seria improvável obter os mesmos resultados a partir de uma investigação tradicional, nos moldes usualmente aplicados, instalando-se um número mínimo necessário de poços de monitoramento. Para se alcançar um resultado semelhante seria necessária a instalação de um número grande de poços de monitoramento, o que provavelmente seria realizado ao longo de anos de trabalhos de investigação.

Segundo Adamason *et al.* (2014) o uso de ferramentas de alta resolução, particularmente para locais com solos com baixa condutividade, é um instrumento importante para a remediação de áreas contaminadas. O uso de ferramentas de alta resolução, como o MIP, é adequado para a aquisição de dados a fim de entender a distribuição relativa de contaminantes em um site, reduzido a necessidade de perfilagem do solo com o uso de testemunhos, que requer análises laboratoriais caras para delinear com precisão a distribuição de contaminantes. Assim, o benefício econômico de se utilizar o MIP como ferramenta de caracterização, especificamente para locais com solos de baixo k, é uma questão importante para a comunidade de remediação ambiental.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta revisão sistemática foram apresentados estudos que envolvem a aplicação de técnicas de investigação de alta resolução com uso de sondas geotécnicas. As técnicas discutidas foram: *Membrane Interface Probe* (MIP); *Hydraulic Profiling Tool* (HPT); *Hydraulic Profiling Tool – Groundwater Sampling* (HPT-GWS); e *Optical image profiler* (OIP). Foi possível reunir informações a respeito dessas ferramentas, o modo de

funcionamento, as limitações de uso, os tipos de contaminantes alvos, bem como a viabilidade de aplicação diante das vantagens e limitações de cada uma delas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMSON, David T. *et al.* Membrane interface probe protocol for contaminants in low-permeability zones. **Groundwater**, v. 52, n. 4, p. 550-565, 2014.

ALGREEN, Mette *et al.* Using pre-screening methods for an effective and reliable site characterization at megasites. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 19, p. 14673-14686, 2015.

ASTM, E1689-95(2014). Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

BARBER, J.; DYMENT, S.; PITKIN, S. High-Resolution Site Characterization for Groundwater Short Course. In: **23rd Annual NARPM Training Program**. USEPA, 2014.407 p. Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/pdfs/HRSC-Participant-Manual-NARPM-2014.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 420. Brasil: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009.

BORDEN, Robert C.; CHA, Ki Young; LIU, Gaisheng. A physically based approach for estimating hydraulic conductivity from HPT pressure and flowrate. **Groundwater**, v. 59, n. 2, p. 266-272, 2021.

BUMBERGER, J. *et al.* A Triggered Depth-Dependent Sampling System to Overcome the Carry-Over Effects of the Membrane Interface Probe. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 36, n. 3, p. 54-61, 2016.

CHO, Junghwan; HOWARD, Zachary; KURUP, Pradeep. Electronic nose system combined with membrane interface probe for detection of VOCs in water. In: **AIP Conference Proceedings**. American Institute of Physics, 2011. p. 211-212.

CHRISTY TM, PIPP DA, MCCALL W. Membrane interface probe protocol for contaminants in low-permeability zones. **Ground Water**. 2015

COHEN, Grégory JV *et al.* LNAPL source zone delineation using soil gases in a heterogeneous silty-sand aquifer. **Journal of contaminant hydrology**, v. 192, p. 20-34, 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Diretoria Plena. Decisão de Diretoria nº 038/2017/C. São Paulo: CETESB, 2017.

CURRY, Patrick *et al.* Smart Characterization—An Integrated Approach for Evaluating a Complex 1, 4-Dioxane Site. **Remediation Journal**, v. 27, n. 1, p. 29-45, 2016.

DIETMANN, Karen Maria *et al.* Fluorescing Layered Double Hydroxides as Tracer Materials for Particle Injection during Subsurface Water Remediation. **ChemEngineering**, v. 4, n. 3, p. 53, 2020.

DUTTA, Susom *et al.* Field evaluation of 1.75 groundwater profiler and field screening device for on-site contamination profiling of chromium (VI) in groundwater. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 7, p. 1-18, 2021.

INTERSTATE TECHNOLOGY REGULATORY COUNCIL – ITRC. **Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management**, 2003. Disponível em <https://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=90>. Acesso em 08 out. 2021.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). **Implementing Advanced Site Characterization Tools**. Washington: ITRC, 2019. 328 p. Disponível em: https://asct-1.itrcweb.org/asct_full_pdf_12_15_19.pdf. Acesso em: 20 dez. 2021.

FJORDBØGE, Annika S. *et al.* Integrity of clay till aquitards to DNAPL migration: Assessment using current and emerging characterization tools. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 37, n. 3, p. 45-61, 2017.

GEOPROBE, 2017. **Geoprobe Membrane Interface Probe (MIP) Standard Operating Procedure**. Technical Bulletin No. MK3010. <http://geoprobe.com/mip-membrane-interface-probe>. Acesso em: 07/09/2021

Geoprobe, 2016 Geoprobe® **Hydraulic Profiling Tool (HPT)**. <https://geoprobe.com/direct-image/hpt-hydraulic-profiling-tool>. Acesso em: 06/09/2021

GEOPROBE, 2017 Geoprobe **optical imaging profiler (OIP): standard operating procedure**. Kejr, Inc., Salina. <http://geoprobe.com/optical-imaging-profiler>. Acesso em: 07/09/2021.

KANSAS. Geoprobe. System Standard Operating Procedure. **Technical Bulletin No. MK3137**: hydraulic profiling tool (hpt). Hydraulic Profiling Tool (HPT). 2007. Disponível em: www.geoprobe.com. Acesso em: 01 out. 2021.

KANSAS. Geoprobe. HPT Logging System for Geo-Environmental Investigations. **Technical Bulletin No. MK3184**: hydraulic profiling tool (hpt). Hydraulic Profiling Tool (HPT). 2011. Disponível em: www.geoprobe.com. Acesso em: 06 set. 2021.

KANSAS. Geoprobe. Model MB470 Mechanical Bladder Pump, Standard Operating Procedure. **Technical Bulletin No. MK3013**: hydraulic profiling tool (hpt). Hydraulic Profiling Tool (HPT). 2011. Disponível em: www.geoprobe.com. Acesso em: 06 set. 2021.

GRUIZ, Katalin; MEGGYES, Tamás; FENYVESI, Éva (Ed.). **Engineering Tools for Environmental Risk Management: 3. Site Assessment and Monitoring Tools**. CRC Press, 2017.

MARTAC, Eugen; DANDASHI, Nidal. Best Practice on Oil Contaminated Sites: A Reliable and Cost-Effective Site Characterization Using a Dual LIF Simultaneous UVOST®-TarGOST®; A Cone Penetration Testing Approach. In: **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference**. OnePetro, 2020.

MCCALL, Wesley *et al.* Field application of the combined membrane-interface probe and hydraulic profiling tool (MiHpt). **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 34, n. 2, p. 85-95, 2014.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M., EVALD, M. K., Applying the HPT-GWS for hydroschtrigraphy, water quality and aquifer recharge investigations. **Groundwater Monitoring & Remediation** 37, 78-91, 2017.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M. The Hydraulic Profiling Tool for Hydrogeologic Investigation of Unconsolidated Formations. **Groundwater Monitoring & Remediation**, [s. l], v. 40, n. 3, p. 89-103, 11 jun. 2020.

MCCALL, W. *et al.* Evaluation and application of the optical image profiler (OIP) a direct push probe for photo-logging UV-induced fluorescence of petroleum hydrocarbons. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, p. 1-15, 2018.

MCCALL, W.; CHRISTY, T. M. The hydraulic profiling tool for hydrogeologic investigation of unconsolidated formations. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 40, n. 3, p. 89-103, 2020.

MILANI, M.; CARVALHO, A. Study of high-resolution site characterization technologies for the improvement of the conceptual site model—case study: Duque de Caxias (RJ), Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 327-337, 2021.

MOUSAVI, M. *et al.* In situ characterization of temperature and gas production using membrane interface probe (MIP) and hydraulic profiling tool (HPT) in an operating municipal solid waste landfill. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2020.

MOUSAVI, M. *et al.* In: Characterization of Municipal Solid Waste Using Membrane Interface Probe (MIP) and Hydraulic Profiling Tool (HPT) in an Active and Closed Landfill. **Infrastructures**, v. 6, n. 3, p. 33, 2021.

NETTO, L. *et al.* Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. **Journal of Applied Geophysics**, v. 178, p. 104049, 2020.

NIVORLIS, A. *et al.* Multidisciplinary characterization of chlorinated solvents contamination and in-situ remediation with the use of the direct current resistivity and time-domain induced polarization tomography. **Geosciences**, v. 9, n. 12, p. 487, 2019.

RIYIS, M. T.; GIACHETI, H. L. The resistivity piezocone for high resolution geo-environmental site investigation: A Brazilian example. In: **Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications-Proceedings of the International Symposium, ISSMGE TC 215**. 2013. p. 617-623.

RIYIS, Marcos Tanaka *et al.* Resistivity piezocone in the conceptual site model definition. **Soils And Rocks**, v. 40, n. 2, p. 93-107, 2017

ROSENBERG, Louise *et al.* Vertical Hydraulic Gradient Estimation in Clay Till, Using MiHPT Advanced Direct-Push Technology. **Groundwater Monitoring & Remediation**, 2021.

SCHNEIDER, Haley A. *et al.* High-Resolution Characterization of a Chlorinated Solvent Impacted Aquifer Using a Passive Profiler. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 40, n. 4, p. 27-43, 2020.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N. **The New ROI: Return of Investment by Utilizing SMART Characterization Methods. Ground Water Monitoring and Remediation**, 35-n3. Summer: 25-33. 2015

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **What is HRSC?** Disponível em <http://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm>. Acesso em 05/09/2021

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Why Use HRSC?** Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrscintro.cfm#introwhy>. Acesso em: 26 out. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Office of Solid Waste and Emergency (5203P). **Best Management Practices: Use of Systematic Project Planning Under a Triad Approach for Site Assessment and Cleanup**. EPA 542- F-10-010.

ANEXO A

ADAMSON, David T. *et al.* Membrane interface probe protocol for contaminants in low-permeability zones. **Groundwater**, v. 52, n. 4, p. 550-565, 2014.

ALGREEN, Mette *et al.* Using pre-screening methods for an effective and reliable site characterization at megasites. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 19, p. 14673-14686, 2015. Oct;22(19):14673-86.

BORDEN, Robert C.; CHA, Ki Young; LIU, Gaisheng. A physically based approach for estimating hydraulic conductivity from HPT pressure and flowrate. **Groundwater**, v. 59, n. 2, p. 266-272, 2021.

BUMBERGER, Jan *et al.* A Triggered Depth-Dependent Sampling System to Overcome the Carry-Over Effects of the Membrane Interface Probe. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 36, n. 3, p. 54-61, 2016.

CHO, Junghwan; HOWARD, Zachary; KURUP, Pradeep. Electronic nose system combined with membrane interface probe for detection of VOCs in water. In: **AIP Conference Proceedings**. American Institute of Physics, 2011. p. 211-212.

CHRISTY, Thomas M.; PIPP, Daniel A.; MCCALL, Wesley. Membrane Interface Probe Protocol for Contaminants in Low-Permeability Zones. **Groundwater**, v. 2, n. 53, p. 185-186, 2015.

COHEN, Grégory JV *et al.* LNAPL source zone delineation using soil gases in a heterogeneous silty-sand aquifer. **Journal of contaminant hydrology**, v. 192, p. 20-34, 2016.

CURRY, Patrick *et al.* Smart Characterization—An Integrated Approach for Evaluating a Complex 1, 4-Dioxane Site. **Remediation Journal**, v. 27, n. 1, p. 29-45, 2016.

DIETMANN, K. *et al.* Fluorescing Layered Double Hydroxides as Tracer Materials for Particle Injection during Subsurface Water Remediation. **Chem Engineering**, v. 4, n. 3, p. 53, 2020.

DUTTA, S. *et al.* Field evaluation of 1.75 groundwater profiler and field screening device for on-site contamination profiling of chromium (VI) in groundwater. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 7, p. 1-18, 2021.

FJORDBØGE, Annika S. *et al.* Integrity of clay till aquitards to DNAPL migration: Assessment using current and emerging characterization tools. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 37, n. 3, p. 45-61, 2017.

GRUIZ *et al.*, 2016 K. GRUIZ, T. MEGGYES, É. FENYVESI **Engineering Tools for Environmental Risk Management 3 — Assessment and Monitoring Tools**, p. 291 CRC Press, Leiden (2016)

MARTAC, Eugen; DANDASHI, Nidal. Best Practice on Oil Contaminated Sites: A Reliable and Cost-Effective Site Characterization Using a Dual LIF Simultaneous UVOST®-

TarGOST®; A Cone Penetration Testing Approach. In: **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference**. OnePetro, 2020.

MCCALL, Wesley *et al.* Field application of the combined membrane-interface probe and hydraulic profiling tool (MiHpt). **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 34, n. 2, p. 85-95, 2014.

MCCALL, Wesley; CHRISTY, Thomas M.; EVALD, Mateus K. Applying the HPT-GWS for hydrostratigraphy, water quality and aquifer recharge investigations. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 37, n. 1, p. 78-91, 2017.

MCCALL, Wesley *et al.* Evaluation and application of the optical image profiler (OIP) a direct push probe for photo-logging UV-induced fluorescence of petroleum hydrocarbons. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, p. 1-15, 2018.

MCCALL, Wesley; CHRISTY, Thomas M. The hydraulic profiling tool for hydrogeologic investigation of unconsolidated formations. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 40, n. 3, p. 89-103, 2020.

MILANI, M.; CARVALHO, A. Study of high-resolution site characterization technologies for the improvement of the conceptual site model—case study: Duque de Caxias (RJ), Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 327-337, 2021.

MOUSAVI, M. Sina *et al.* In situ characterization of temperature and gas production using membrane interface probe (MIP) and hydraulic profiling tool (HPT) in an operating municipal solid waste landfill. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2020.

MOUSAVI, M. *et al.* In Situ Characterization of Municipal Solid Waste Using Membrane Interface Probe (MIP) and Hydraulic Profiling Tool (HPT) in an Active and Closed Landfill. **Infrastructures**, v. 6, n. 3, p. 33, 2021.

NETTO, L. *et al.* Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. **Journal of Applied Geophysics**, v. 178, p. 104049, 2020.

NIVORLIS, Aristeidis *et al.* Multidisciplinary characterization of chlorinated solvents contamination and in-situ remediation with the use of the direct current resistivity and time-domain induced polarization tomography. **Geosciences**, v. 9, n. 12, p. 487, 2019.

RIYIS, M. T.; GIACHETI, H. L. The resistivity piezocone for high resolution geo-environmental site investigation: A Brazilian example. In: **Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics: From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications-Proceedings of the International Symposium, ISSMGE TC 215**. 2013. p. 617-623. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/76006>>.

RIYIS, Marcos Tanaka *et al.* Resistivity piezocone in the conceptual site model definition. **Soils And Rocks**, v. 40, n. 2, p. 93-107, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/163373>>.

ROSENBERG, Louise *et al.* Vertical Hydraulic Gradient Estimation in Clay Till, Using MiHPT Advanced Direct-Push Technology. **Groundwater Monitoring & Remediation**, 2021.

SCHNEIDER, Haley A. *et al.* High-Resolution Characterization of a Chlorinated Solvent Impacted Aquifer Using a Passive Profiler. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 40, n. 4, p. 27-43, 2020.

SUTHERSAN, S.; QUINNAN, J.; WELTY, N. **The New ROI: Return of Investigations by Utilizing SMART Characterization Methods.** **Ground Water Monitoring and Remediation**, 35-n3. Summer: 25-33. 2015.