

Artigo Técnico

Avaliação de diferentes condições de pressão de vácuo na operação de sistema de remediação com extração multifásica

Evaluation of different vacuum pressure conditions on a multiphase extraction remediation system operation

Diego Botelho Ruas^{1*}, Andrea Ferreira Borges², Gerson Cardoso Silva Junior³

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes condições de pressão de vácuo na operação de sistema de remediação com extração multifásica (MPE), em escala real, implantado em uma área industrial. Para essa finalidade, foram realizadas a instalação e o monitoramento contínuo de um poço de extração (PE) e três poços de observação (POs), além da operação do sistema MPE em três etapas operacionais de pressão de vácuo: -1,202, -2,517 e -3,120 mmca. Pelos resultados obtidos foi possível constatar, principalmente, que o aumento da pressão de vácuo no PE não refletiu necessariamente no aumento da vazão gasosa, mas apenas na vazão aquosa em determinada faixa de aplicação de vácuo. A condição operacional mínima de vácuo em -1,202 mmca resultou no maior valor médio de vácuo entre os POs (no PO-01 igual a 29,5 mmca). Constatou-se que o aumento da pressão de vácuo aplicada, associado ao maior rebaixamento do nível de água no poço PE, não influenciou diretamente no rebaixamento do nível de água dos POs. Os seguintes fatores foram levantados como potenciais justificativas para os comportamentos nas diferentes condições operacionais do sistema MPE: perdas de carga; acúmulo de água na linha de extração; e ocorrência de precipitação pluviométrica. Este estudo demonstrou a importância de avaliar previamente as condições operacionais de sistema MPE, antes da implantação da técnica, uma vez que o aumento da pressão de vácuo no PE não implica necessariamente na otimização do processo.

Palavras-chave: remediação; extração multifásica; água subterrânea.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of different vacuum pressure conditions on a full-scale multiphase extraction (MPE) remediation system operation, implemented in an industrial area. For this purpose, installation and continuous monitoring of one extraction well (PE) and three observation wells (POs) were performed, as well as a MPE system operating in three operational phase of vacuum pressures: -1,202; -2,517; -3,120 mmca. The results obtained allow concluding mainly that an increase in applied vacuum pressure in PE did not necessarily result in increased gas flow rate, but caused an increase only water flow rate in the specific vacuum pressures range. The minimum operating condition of vacuum pressure applied to the MPE system resulted in the highest vacuum average value among the POs (PO-01 equal to 29,5 mmca). Increasing pressure applied by the MPE system, with concomitant deeper well drawdown of PE, does not directly influence the drawdown of water levels in the POs. The following factors were listed as potential reasons for the behavior in different operating conditions of the MPE system: head losses; accumulation of water in the extraction line; and the occurrence of rainfall. This study demonstrated the need and importance of previously evaluating the operation conditions MPE system, before their stallation, since the increase of the vacuum pressure in PE does not necessarily lead to optimization of the process.

Keywords: remediation; multiphase extraction; groundwater.

INTRODUÇÃO

Poluentes de origem industrial podem ingressar diretamente no meio ambiente como resultado de acidentes, derramamentos e vazamentos durante o transporte de produtos ou armazenamento inadequado de combustíveis, entre outros fatores. Nessa situação, a contaminação do

solo e da água subterrânea geralmente ocorre quando a carga de contaminantes sobre o subsolo excede a capacidade natural de atenuação dos estratos litológicos. Em termos de risco para a saúde humana, o cenário de contaminação com hidrocarbonetos e derivados de petróleo torna-se ainda mais preocupante quando ocorre a migração de substâncias tóxicas

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Duque de Caxias (RJ), Brasil.

²Professora adjunta do Departamento de Geologia da UFRJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Professor associado e coordenador do Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

*Autor correspondente: diegoruas@yahoo.com.br

Recebido: 25/08/16 - Aceito: 03/02/17 - Reg. ABES: 168385

no subsolo, alcançando a água subterrânea em uma possível fonte de abastecimento de água para o consumo humano (SUTHERSAN, 1996).

A investigação da contaminação do solo e das águas subterrâneas com presença de hidrocarbonetos, e sua respectiva descontaminação com implantação e operação de sistemas de remediação, tem sido objeto de grande discussão nas últimas décadas em países industrializados e em desenvolvimento, acompanhando os avanços de uma legislação ambiental com valores orientadores cada vez mais restritivos. A preocupação em termos de risco à saúde humana em unidades industriais com armazenamento e processamento de hidrocarbonetos visa, principalmente, à remoção de fase livre não miscível em água (NAPL) e também dissolvida dos compostos orgânicos voláteis, tais como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (denominados compostos BTEX), hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA), bifênilas policloradas (PCBs) e hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) presentes no solo e na água subterrânea (KHAN; HUSAIN; HEJAZI, 2004).

Diante desse cenário de contaminação, classicamente aplicou-se a técnica de remediação considerada pioneira na descontaminação de água subterrânea, a saber: sistema com bombeamento e tratamento (*pumpandtreat* — P&T). Essa técnica promove a extração da água subterrânea contaminada do aquífero e seu posterior tratamento em módulo externo (SUTHERSAN, 1996). Esse sistema, embora largamente empregado, mostrou-se frequentemente ineficiente, demorado e custoso. Com isso, alternativas tecnológicas de remediação de solo e águas subterrâneas vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas, contemplando diferentes tratamentos físico-químicos e biológicos. Dentre essas alternativas, o sistema de extração multifásica (MPE) representa uma tecnologia

com grande potencial para o tratamento de áreas contaminadas com hidrocarbonetos (U.S. ARMY, 1999; KHAN; HUSAIN; HEJAZI, 2004; BALDWIN *et al.*, 2009).

O princípio básico do sistema MPE é realizar a aplicação de vácuo junto ao nível d'água do aquífero, promovendo a formação de um escoamento multifásico em subsuperfície, com a remoção de vapor/ar, água e possível presença de fase imiscível (U.S. ARMY, 1999). O sistema MPE consiste na combinação das técnicas de P&T e de extração de vapores (*Soil Vapor Extraction* — SVE). Por suas características de promover a remoção simultânea das fases vapor, dissolvida e livre, o sistema MPE possui potencial aplicação na remediação das zonas vadosa e saturada, em cenários de contaminação com hidrocarbonetos que se particionam no ar, na água e no solo em subsuperfície (LU *et al.*, 2012). Além disso, o sistema MPE pode promover, concomitantemente, uma estimulação na biodegradação aeróbia devido à aeração da zona não saturada, ocasionada pela indução do fluxo de ar das áreas adjacentes ao poço de extração (PE) (BALDWIN *et al.*, 2009).

A Figura 1 apresenta uma das configurações do sistema MPE utilizada neste estudo: *single pump* ou *two phase extraction* (TPE). Nessa configuração, existe um único tubo pescador, posicionado acima do nível de água, que é utilizado para a extração simultânea da água subterrânea e dos vapores. Essa técnica encontra-se limitada a profundidades de até 27 m (SUTHERSAN, 1996).

Nesse sentido, uma das vantagens da aplicação da técnica MPE é sua capacidade de promover a extração simultânea das fases da água — vapor, dissolvida e livre —, sendo aplicada tanto na zona saturada quanto na zona vadosa do subsolo. A técnica permite que compostos voláteis, inicialmente

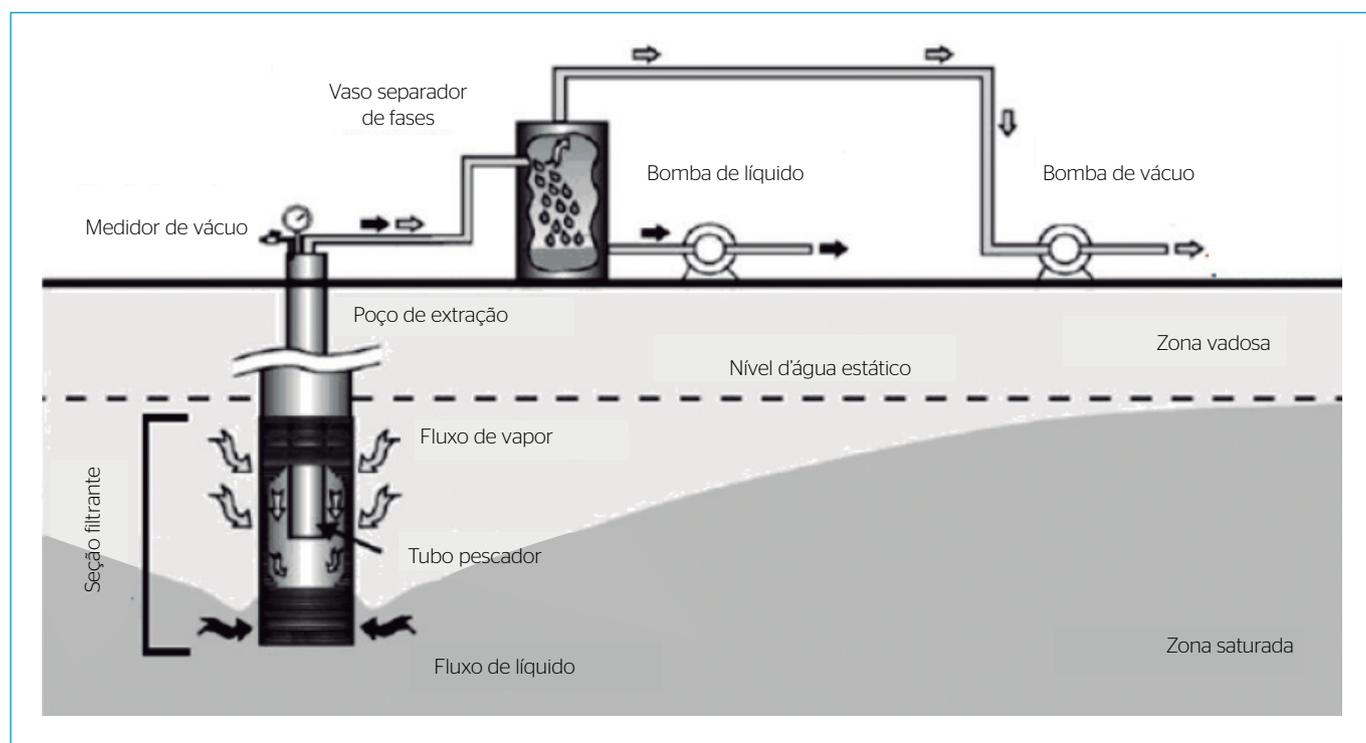


Figura 1 - Configuração do sistema de extração multifásica - *two phase extraction* (adaptado de U.S. ARMY, 1999).

adsorvidos na zona saturada do solo, fiquem expostos, volatilizem e sejam extraídos por meio do fluxo de ar e vapor gerado pelo vácuo induzido no sistema MPE. Outra vantagem dessa tecnologia é que a água subterrânea extraída pelo sistema tem os compostos solúveis removidos, contribuindo para o aumento da massa de contaminantes extraídos.

Este trabalho teve como objetivo, portanto, avaliar a influência de diferentes condições de pressão de vácuo na operação de sistema MPE, em escala real, implantado em uma unidade industrial.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

O estudo de avaliação da operação do sistema MPE foi realizado durante 17 dias, no solo da área de serviços de manutenção de equipamentos localizada na região central de uma unidade industrial.

Para a caracterização geoambiental e hidrogeológica dessa área, foram realizados ensaios granulométricos, determinação da condutividade hidráulica com metodologia *slug test* (BOUWER & RICE, 1976), ensaios para obtenção de parâmetros geotécnicos, sondagens de investigação ambiental e instalação de poços de monitoramento. De acordo com os resultados da caracterização hidrogeológica, estabeleceu-se o modelo conceitual fornecendo subsídios para avaliar, em escala real, os parâmetros operacionais do sistema MPE. As metodologias e os procedimentos adotados neste estudo seguiram as principais orientações do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo — CETESB (1999), e das normas padronizadas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) — principalmente 15492/2007 (ABNT 2007a), 15495-1/2007 (ABNT 2007b), 15495-2/2008 (ABNT 2008) e EMBRAPA (1999) —, utilizando laboratório certificado e acreditado para as análises.

Sistema de remediação com extração multifásica

Descrição do sistema de remediação com extração multifásica

O sistema MPE instalado na área industrial consiste em uma unidade modular incluindo diversos equipamentos, tais como: compressor, bombas, tanque de vácuo, caixa separadora de água e óleo, tambor coletor, filtros de carvão ativado, poços de extração, tubo pescador, mangotes, tubulações e instrumentação (manômetros, hidrômetros etc.). A Figura 2 apresenta a visualização do sistema MPE e dos seus equipamentos internos.

Com a unidade MPE em operação, os vapores e a água subterrânea são extraídos do interior do PE, instalado na área por meio do vácuo gerado pelo compressor. Os vapores e a água subterrânea extraídos fluem por meio do tubo pescador do PE, em seguida pelo mangote flexível e pela tubulação rígida até o tanque de vácuo. Esse tanque tem a função de minimizar o arrasto de gotículas de água para o compressor por meio do *demister* instalado, como também promover o acúmulo de águas removidas a partir do PE. Do tanque de vácuo a água acumulada é transferida por bombeamento para a caixa separadora de água e óleo. A partir desta, a fase oleosa menos densa do que a água pode ser drenada por gravidade para um tambor coletor de óleo, e a fase aquosa é bombeada para filtração das partículas sólidas por meio dos filtros cartuchos e, em seguida, para os filtros de carvão ativado, ambos instalados em série com a finalidade de retenção dos compostos orgânicos dissolvidos. Após filtração, a água tratada segue para a canaleta interna da rede de efluentes da unidade industrial. A alimentação das bombas é realizada por um compressor de ar do tipo pistão, que opera de forma intermitente pelo comando de um pressostato. Por sua vez, os vapores provenientes do tanque de vácuo são direcionados para um par de filtros de carvão ativado, instalados em série, que adsorverão os compostos orgânicos voláteis, liberando o ar tratado para a atmosfera. Como medidas de segurança contra vazamentos e derramamento, a unidade de remediação MPE possui chaves de nível



Figura 2 - Visualização do sistema de remediação de extração multifásica e dos seus equipamentos internos.

instaladas com pontos de atuação de nível alto-alto para desarme dos equipamentos (exaustor e bombas), contando com controlador lógico programável (CLP) para supervisão e programação da unidade.

Avaliação das condições operacionais do sistema de remediação com extração multifásica

As condições operacionais do sistema MPE foram avaliadas pelo monitoramento da variação de vácuo nos PEs, poços de observação – POs (PO-01, PO-02 e PO-03) e poços de monitoramento – PMs (PM-01, PM-01A, PM-01C e PM-06), do volume de água removida e da vazão de vapor extraído. Para essa finalidade, utilizou-se a seguinte metodologia:

- operação da unidade modular de extração multifásica, incluindo montagens mecânicas de tubulações, mangueiras e instrumentos;
- instalação dos PEs e POs, perfurados com sistema mecanizado de trado helicoidal oco, conforme disposição espacial e arranjo apresentados na Figura 3.

No Quadro 1 são apresentadas as características dos poços instalados (extração e observação) para a realização deste estudo.

Visando a avaliar a influência de diferentes pressões de vácuo na operação do sistema MPE, a análise desse sistema foi realizada em três etapas, a saber:

- etapa 1: condição de pressão mínima
 - pressão média no cabeçote do PE: -1.202 mmca;
 - frequência média de rotação do compressor: 22 Hz;
 - comprimento do tubo pescador: 1,35 m;
 - tempo de operação: 72 h.
- etapa 2: condição de pressão média
 - pressão média no cabeçote do PE: -2.517 mmca;
 - frequência média de rotação do compressor: 26 Hz;
 - comprimento do tubo pescador: 1,65 m;
 - tempo de operação: 72 h.
- etapa 3: condição de pressão máxima
 - pressão média no cabeçote do PE: -3.120 mmca;
 - frequência média de rotação do compressor: 31 Hz;
 - comprimento do tubo pescador: 1,95 m;
 - tempo de operação: 96 h (devido ao tempo de final de semana, sem monitoramento).

As diferentes condições de pressão de vácuo aplicado no PE foram ajustadas por meio de inversor de frequência presente na unidade MPE, que permite alterar a curva de operação do compressor para a condição de operação desejada. Após 72 h de ensaio, a Etapa 1 foi finalizada

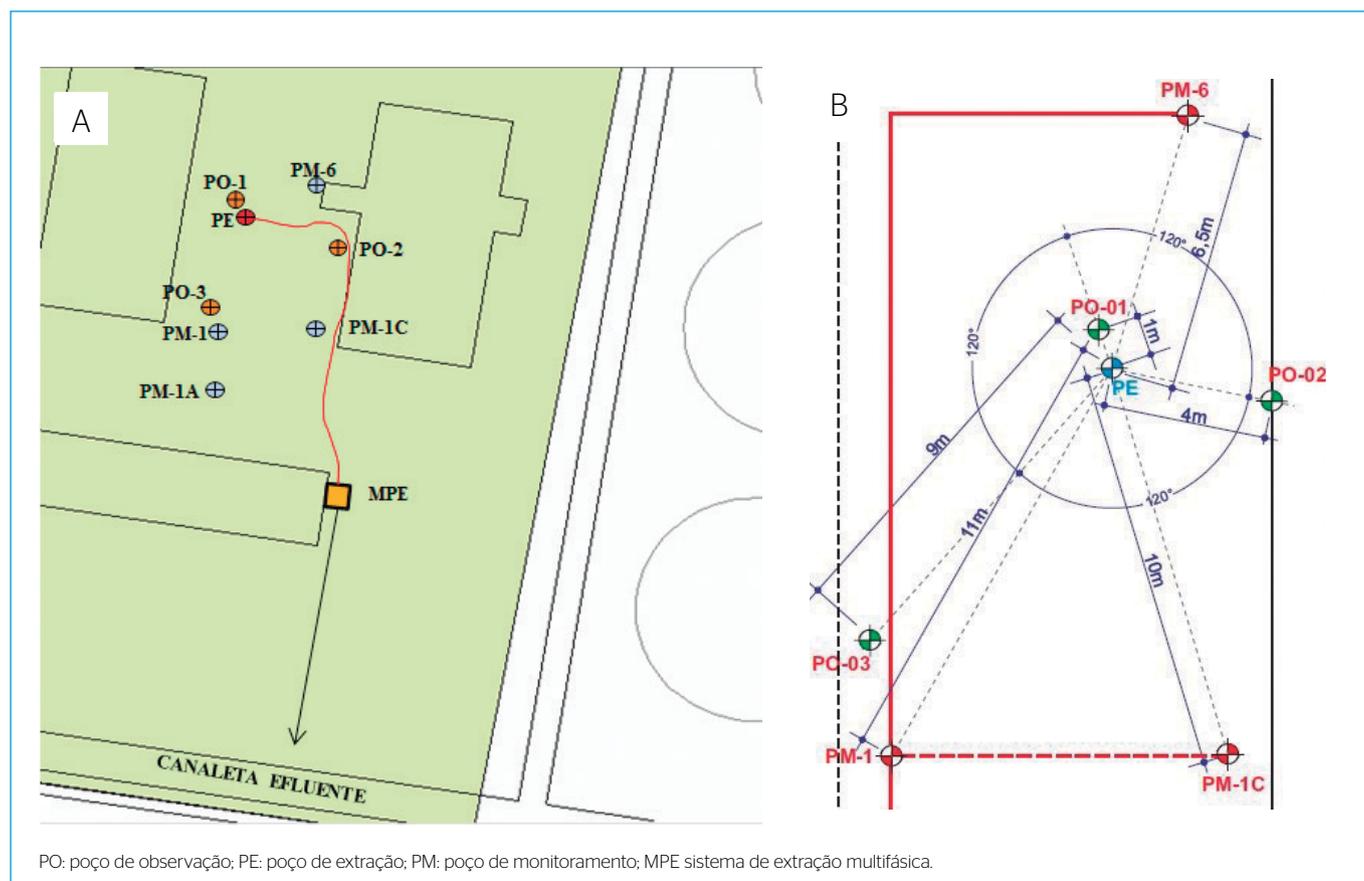


Figura 3 - Disposição e arranjo dos poços de extração, observação (PO-01, PO-02 e PO-03) e de monitoramento (PM-01, PM-01A, PM-01C e PM-06) utilizados na avaliação dos parâmetros operacionais do sistema de remediação com extração multifásica.

e o sistema MPE ficou desligado até o dia da próxima etapa prevista, aplicando-se essa mesma metodologia na conclusão das Etapas 2 e 3.

As pressões estabelecidas nas etapas supracitadas foram definidas de acordo com a recarga do PE, visando a evitar pressões que proporcionassem “afogamento” desse poço (aumento do nível de água pelo aquífero acima do nível de sucção do tubo pescador) e perda de eficiência do estudo. Visando, ainda, a evitar o afogamento do PE, adotou-se outro ajuste pela abertura parcial de válvula para a entrada de ar atmosférico complementar no PE, conforme identificado ao longo do ensaio nas condições de campo. Possíveis causas para a necessidade desse ajuste estão relacionadas à maior umidade do solo em períodos de chuva, o que reduziu a permeabilidade do solo ao ar, promoveu a ausência de entrada de ar pela atmosfera em função do piso concretado e causou diminuição da seção da mangueira de extração devido ao acúmulo de água extraída em pontos baixos. Utilizando-se do recurso de entrada de ar pela atmosfera, o tubo pescador foi ajustado em alturas que garantiram o não afogamento do poço.

Foram instalados transdutores de pressão do tipo *level loggers* para o monitoramento contínuo da variação do nível d'água nos 6 poços envolvidos (equipamento fornecendo registros a cada 15 s, resultando em mais de 34.000 medições por poço), durante as diferentes etapas deste estudo. Particularmente, no poço mais distante do PE (PM-01A, distante a 20 m) foi instalado, acima do nível d'água, um barômetro (*barologger*) para medição da variação da pressão atmosférica da área visando a compensar os desvios naturais gerados. Instrumentos do tipo vacuômetro foram instalados no eixo principal a montante do vaso separador do sistema MPE, juntamente no cabeçote dos poços, permitindo medir as pressões alcançadas no sistema e medir as perdas de carga distribuída e localizada da linha de extração.

Quadro 1 - Características dos poços instalados (extração e observação) para a realização do estudo.

Parâmetro	PE	PO
Profundidade do poço (referência: piso)	3,20 m	3,20 m
Posição da seção filtrante	Inicia a 0,20 m do piso com comprimento total de 3,00 m	Inicia a 0,20 m do piso com comprimento total de 3,00 m
Posição do pré-filtro	Inicia a 0,10 m do piso	Inicia a 0,10 m do piso
Diâmetro da perfuração	6"	4"
Diâmetro do poço/material	4"/PVC	2"/PVC
Material pré-filtro	Areia selecionada: 0,50 a 1,00 mm	Areia selecionada: 0,50 a 1,00 mm
Espessura das ranhuras transversais	0,25 mm	0,25 mm
Material do selo	Bentonita	Bentonita
Denominação do poço	PE-01	PO-01/PO-02/PO-03

PE: poço de extração; PO: poço de observação; PVC: policloreto de vinila.

Para viabilizar a transferência dos fluidos extraídos do PE até a unidade MPE, foi instalado mangote flexível de 2" de diâmetro, sendo necessário enterrá-lo para proteção de travessia, alcançando comprimento de aproximadamente 40 m. Próximo ao PE foi instalada uma válvula globo cuja função era realizar o ajuste fino do vácuo a ser aplicado. Concluída a instalação hidráulica, realizou-se um teste com pressão para avaliar a estanqueidade das instalações. Somente após a eliminação das entradas de ar falso o sistema foi liberado para a execução deste estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização geoambiental da área de estudo

A caracterização geoambiental da área em remediação contemplou, principalmente, a avaliação de 34 sondagens ambientais de solo, com instalação de 17 pares de poços de monitoramento multiníveis nos mesmos pontos de sondagens. A Figura 4 apresenta a localização dos PMs avaliados na área de remediação com sistema MPE.

A Tabela 1 apresenta a caracterização geotécnica de três amostras indeformadas e deformadas coletadas na fase de perfuração para instalação dos poços de observação na área de estudo do sistema MPE. Tais amostras foram coletadas na profundidade de 2 m, sendo representativas basicamente da camada de aterro, uma vez que a seção filtrante dos POs está quase inteiramente nesse horizonte litológico.

A Figura 5 apresenta os resultados das curvas granulométricas, elaboradas para as amostras obtidas nos pontos de instalação dos POs, apresentando comportamentos semelhantes.

De acordo com os resultados obtidos, a presença de aterros e sedimentos originários da unidade industrial apresentou-se com a seguinte litologia local do topo para a base:

- camada de aterro (superficial)
 - descrição: material siltoarenoso, contendo proporções variáveis de argila e areia de geometria irregular, distribuído praticamente por toda a área;
 - espessura: média de 3,7 m, variando entre 2,7 e 4,2 m, dependendo da localização.
- camada de argila (base)
 - descrição: corresponde ao substrato original, estando presente abaixo da camada de aterro, separada por uma superfície discordante, com pacote de sedimentos de natureza argilosa, plástica, expansiva e de coloração cinza a preta, por vezes com a presença de matéria orgânica;
 - espessura: média identificada de apenas 0,2 m, com variação entre 0,3 e 1,2 m, de acordo com a localização. Vale ressaltar que a espessura da camada de argila não corresponde à sua espessura total, sendo aquela medida em sondagens ambientais

rasas (para instalação de PMs), sem contemplar sondagens mais profundas de percussão (cujos resultados não são apresentados neste estudo).

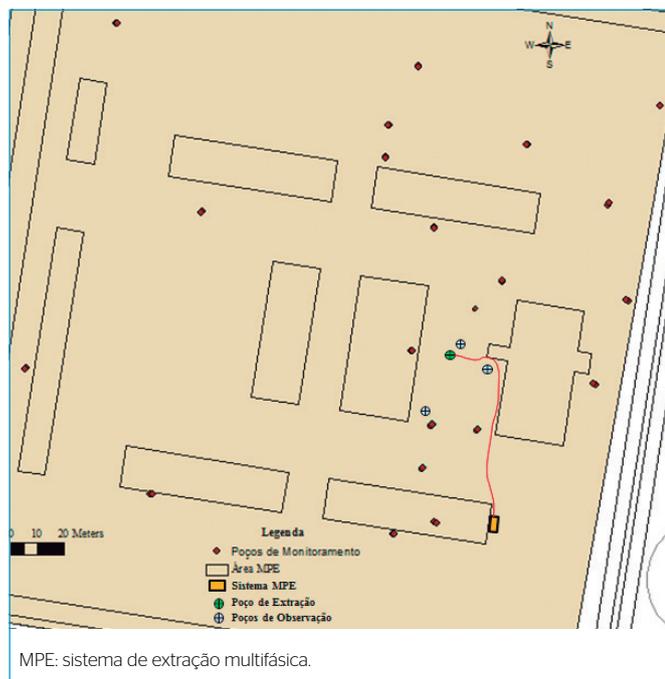


Figura 4 - Localização dos poços de monitoramento, extração e observação instalados na área de remediação com sistema de extração multifásica.

Pela avaliação dos 34 pares de poços multiníveis, incluindo a realização de ensaios *slug test* para a determinação da condutividade hidráulica (BOWER & RICE, 1976), a seguinte caracterização hidrogeológica da área em remediação é apresentada:

Tabela 1 - Caracterização geotécnica das amostras de solo da área de estudo do sistema de remediação com extração multifásica.

Parâmetro	Amostra 1 (PO-01)	Amostra 2 (PO-02)	Amostra 3 (PO-03)
Profundidade de coleta (m)	2,0	2,0	2,0
Densidade de partículas (g/cm ³)	2,6	2,4	2,5
Porosidade total (%)	36,5	33,7	42,4
Fração orgânica do solo (%)	0,4	0,5	0,2
Areia muito grossa - 2,000 mm (%)	10,7	13,7	7,1
Areia grossa - 1,000 mm (%)	16,2	14,2	14,3
Areia média - 0,500 mm (%)	14,4	10,2	13,2
Areia fina - 0,250 mm (%)	5,2	6,7	6,9
Areia muito fina - 0,100 mm (%)	3,1	4,1	7,2
Silte - 0,050 mm (%)	27,4	31,1	31,2
Argila - 0,002 mm (%)	23,0	20,0	20,1
Classificação textural*	Franco argiloso arenoso	Franco	Franco

PO: poço de observação; *Estados Unidos (1975).

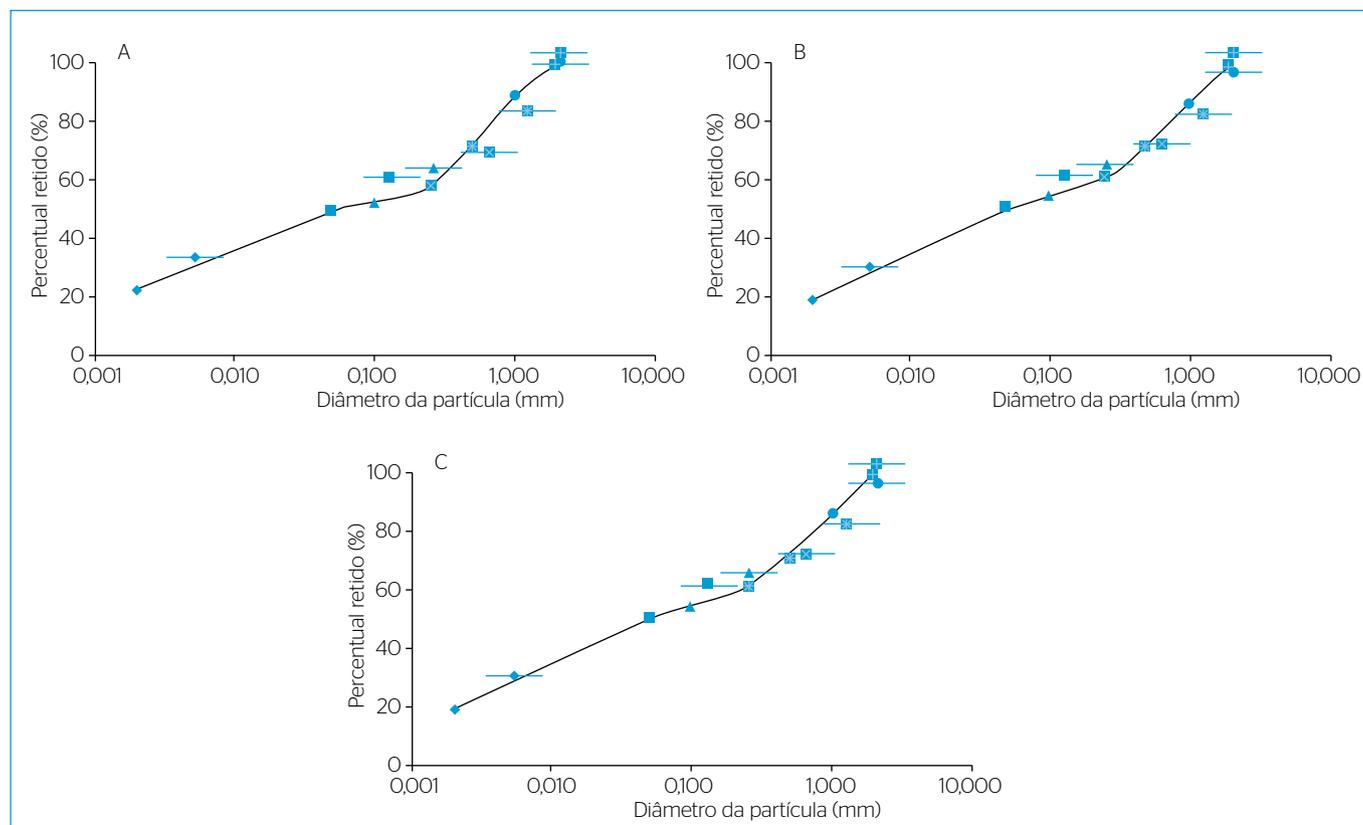


Figura 5 - Resultados das curvas granulométricas dos pontos de instalação dos poços de observação PO-01 (A), PO-02 (B) e PO-03 (C).

- camada de aterro (superficial)
 - nível de água: valor médio de 1,0 m, com valores mínimo e máximo de 0,4 e 1,6, respectivamente;
 - condutividade hidráulica: valor médio de $2,47 \times 10^{-5}$ cm/s, com valores mínimo e máximo de $1,90 \times 10^{-6}$ e $1,41 \times 10^{-4}$ cm/s, respectivamente.
- camada de argila (base)
 - nível de água: valor médio de 1,0 m, com valores mínimo e máximo de 0,3 e 1,7, respectivamente;
 - condutividade hidráulica: valor médio de $3,71 \times 10^{-5}$ cm/s, com valores mínimo e máximo de $2,37 \times 10^{-6}$ e $1,46 \times 10^{-4}$ cm/s, respectivamente.

Os resultados para os dois horizontes — aterro e argila — indicam que as litologias e o comportamento hidrogeológico dessas porções foram semelhantes, incluindo a variação entre os valores máximos e mínimos. Dessa forma, a condutividade hidráulica média (aritmética) obtida para o nível do aquífero da área em remediação com a operação do sistema MPE resultou em $3,09 \times 10^{-5}$ cm/s. Esses resultados — variação

de condutividade hidráulica entre 10^{-6} e 10^{-4} cm/s — mostraram-se coerentes com as litologias constatadas no intervalo da seção filtrante dos PMs, que variaram entre silte, siltearenoso e areia argilosa, conforme indicado por Fetter (2001). Nesse sentido, o aquífero sob a área de remediação com sistema MPE possui caráter livre, nível d'água médio-raso, sendo constituído predominantemente por aterro siltoarenoso a siltoargiloso depositado sobre um horizonte argiloso.

Resultados de monitoramento dos poços de extração e observação pelas diferentes condições de pressão do sistema de remediação com extração multifásica

Após a caracterização da área de estudo, realizou-se a avaliação da operação do sistema MPE em três etapas de aplicação de vácuo no PE (-1.202, -2.517 e -3.120 mmca).

A Figura 6 apresenta os resultados das pressões no PE, assim como as vazões gasosas e aquosas obtidas nas três etapas do estudo do sistema MPE. Para efeito comparativo, considerou-se que as leituras foram realizadas no mesmo horário dentro das 72 h de cada etapa do estudo.

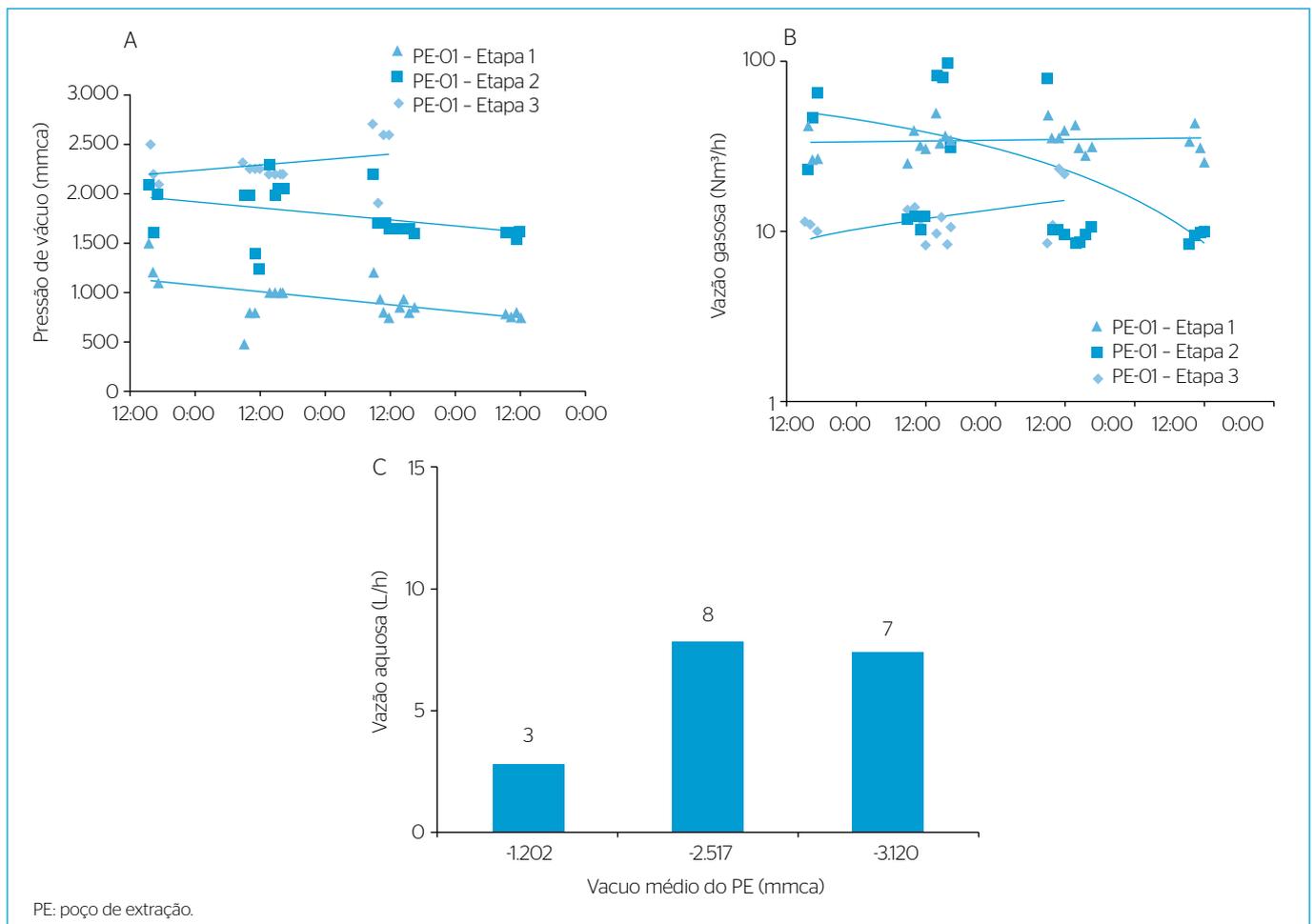


Figura 6 - Resultados do monitoramento da pressão de vácuo (A), da vazão gasosa (B) e da vazão aquosa (C) do poço de extração do sistema com extração multifásica nas três etapas do estudo.

Os valores médios de vácuo alcançados no PE foram de -930, -1.178 e -2.297 mmca, nas Etapas 1, 2 e 3, respectivamente, verificando perdas de carga quando comparados com as pressões médias de vácuo aplicadas no cabeçote do PE, em cada etapa inicialmente. Vale destacar que as pressões médias supracitadas foram calculadas a partir do período do nível dinâmico do poço estabilizado. Por sua vez, os valores médios de vazão gasosa obtidos no PE foram de 35, 30 e 12 Nm³/h, nas Etapas 1, 2 e 3, respectivamente. Dessa forma, constatou-se que, no decorrer do estudo, o aumento da depressão aplicada não refletiu necessariamente no aumento da vazão gasosa. Por outro lado, houve aumento da vazão média aquosa da Etapa 1 (2,8 L/h) para a Etapa 2 (7,9 L/h), com o respectivo aumento da pressão de vácuo aplicado pelo sistema MPE. Todavia, entre as Etapas 2 e 3 (7,4 L/h), não houve aumento da vazão de água extraída. Esse resultado pode ter sido, principalmente, devido às curvas acentuadas (perdas de carga) no trajeto da unidade MPE até o PE e ao acúmulo de água na linha de extração em função da formação de pontos baixos, impedindo o fluxo multifásico. Outro ponto a ressaltar é que houve ocorrência de chuva (Figura 7) no início e no final das Etapas 2 e 3, respectivamente, podendo ter influenciado também os resultados apresentados pela recarga do aquífero, com aumento da umidade do solo (aumento do volume de água extraída), reduzindo a transferência da fase gasosa entre os poros do solo (redução da vazão gasosa extraída).

A Figura 8 apresenta os resultados de vácuo obtidos nos POs (PO-01, PO-02 e PO-03) e no PM-06, decorrentes em cada etapa avaliada. Particularmente, os demais poços monitorados na área — PM-01, PM-01A e PM-01C — apresentaram baixos valores de vácuo no monitoramento (<0,01 mmca), não sendo apresentados neste estudo.

Verificou-se que na Etapa 1, na qual foi aplicada condição operacional mínima (-1.202 mmca), obteve-se o maior valor médio de vácuo no PO (PO-01=29,5 mmca) em todo o estudo. Nas Etapas 2 e 3, apesar da aplicação de maiores pressões de vácuo (-2.517 e -3.120 mmca,

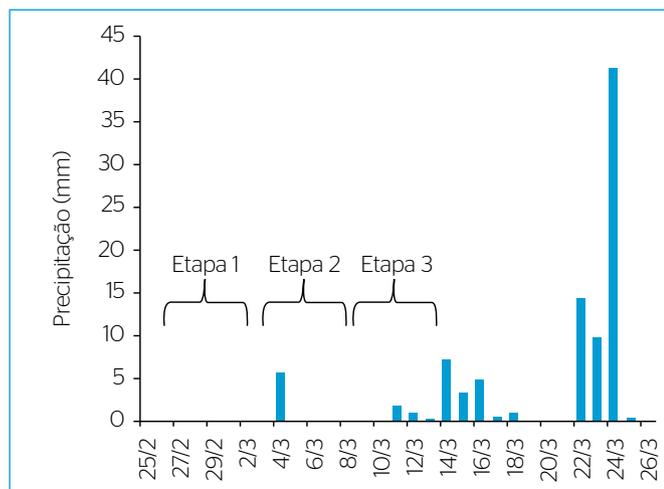


Figura 7 - Resultados de precipitação pluviométrica nas etapas do estudo.

respectivamente), a influência nos POs foi menor, com maiores médias também no PO-01 de 13,5 e 17,4 mmca, respectivamente. Considerando os demais POs, o PO-02 acompanhou o aumento do vácuo aplicado pelo sistema MPE, com aumento nos resultados ao longo das etapas (0,6, 1,2 e 1,3 mmca, respectivamente nas Etapas 1, 2 e 3). Por sua vez, no PO-03, o mais distante entre os POs instalados (a 11 m do poço extrator), de modo semelhante ao constatado no PO-01, houve decréscimo nos resultados de vácuo durante as etapas estudadas em 0,4, 0,2 e 0,1 mmca, respectivamente nas Etapas 1, 2 e 3, verificando, neste caso, menor influência em relação ao vácuo aplicado no PE.

A Figura 9 apresenta os resultados da variação de carga hidráulica nos PEs, POs e PMs na Etapa 1, com pressão de aplicação no PE de aproximadamente -1.202 mmca. Vale destacar que os resultados de carga hidráulica apresentados neste estudo foram obtidos por meio dos registros dos transdutores de pressão instalados nos poços, com monitoramento contínuo — registros a cada 15 s —, que mediram a pressão absoluta presente naquele ponto. Esses dados foram compensados em relação à pressão atmosférica local (barométrica) e, exclusivamente no PE, também em relação ao vácuo presente no poço, para que, efetivamente, fosse possível realizar a medição da coluna de água presente e verificar o rebaixamento causado pela operação do PE.

Na Etapa 1, após o ajuste da pressão e da posição do tubo pescador, o nível dinâmico do PE foi estabilizado com rebaixamento de 81 cm, considerando o nível inicial (261 cm) e a média do nível dinâmico estabilizado no período considerado (180 cm). Verificou-se influência do vácuo aplicado pelo sistema MPE nos POs instalados, com rebaixamentos de carga hidráulica nos poços PO-01 e PO-02 variando de 41 a 7 cm. Nos demais poços, a influência foi mínima ou quase nula. A importância da variação de vácuo nos POs, por meio da operação do sistema MPE, seria baseada na expectativa de maior efetividade na descontaminação de determinada área — contaminada pelo maior raio de influência.

A Figura 10 apresenta os resultados da variação de carga hidráulica nos PEs, POs e PMs na Etapa 2, com pressão de aplicação no PE de aproximadamente -2.517 mmca.

Na Etapa 2, houve maior rebaixamento no PE (104 cm) e maior influência em alguns POs, principalmente pelo maior rebaixamento no PO-02 (15 cm), quando comparado com os resultados da Etapa 1. Houve também influência no rebaixamento do PO-01 (31 cm), todavia, com menor valor em relação à primeira etapa do estudo (menor aplicação de vácuo pelo MPE). Particularmente, constatou-se no PO-03 certo declínio da carga hidráulica de 9,0 cm ao longo do estudo. Conforme já mencionado, houve ocorrência de chuva no período da Etapa 2 para a Etapa 3, o que pode ter influenciado os resultados apresentados pela recarga do aquífero. Nos demais poços, a influência foi reduzida.

A Figura 11 apresenta os resultados da variação de carga hidráulica nos PEs, POs e PMs na Etapa 3, com pressão de aplicação no PE de aproximadamente -3.120 mmca.

Na Etapa 3, o nível dinâmico de água ficou estabilizado apenas no início do estudo experimental e verificou-se recuperação de carga hidráulica no PE, conforme visualizado na Figura 11A, provavelmente influenciada pelas chuvas do período. Nessa etapa, houve o maior rebaixamento do nível de água no PE, alcançando 158 cm. Apesar desse fato, a influência do rebaixamento dos POs não atingiu os maiores níveis neste estudo, resultando, nos poços PO-01 e PO-02, em 32 e 11 cm, respectivamente. Dessa forma, avaliou-se

que o aumento da pressão aplicada pelo sistema MPE entre as etapas estudadas, com concomitante aumento no rebaixamento do nível dinâmico de água do PE, não influenciou diretamente no rebaixamento do nível de água dos POs, conforme resultados consolidados apresentados no Quadro 2.

Entre as condições operacionais avaliadas do sistema MPE, houve diferentes resultados das vazões gasosa e aquosa extraídas em relação à pressão de vácuo aplicada em cada etapa do estudo (Figura 12).

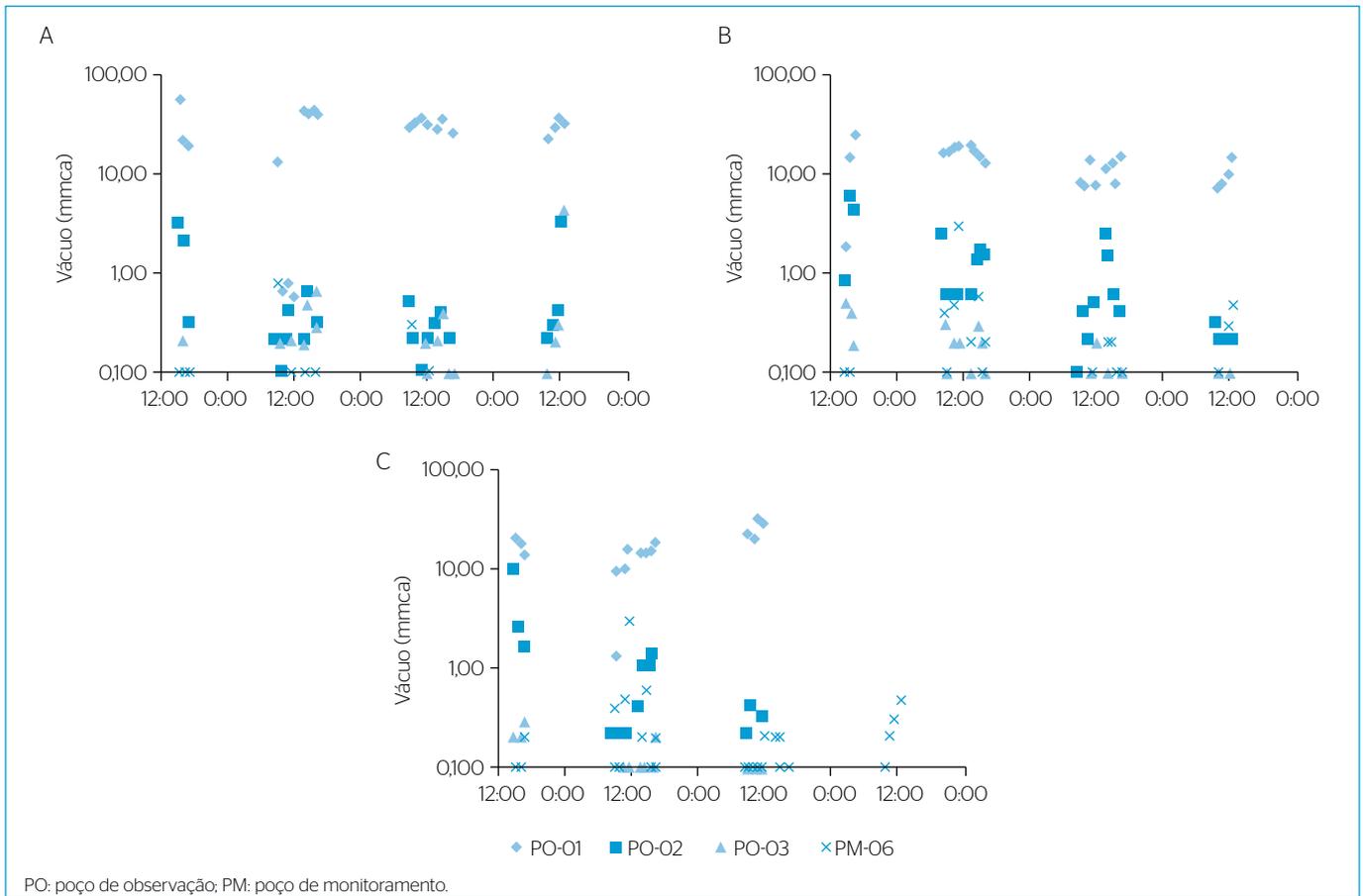


Figura 8 - Resultados de vácuo nos poços de observação (PO-01, PO-02 e PO-03) e no PM-06 nas Etapas (A) 1, (B) 2 e (C) 3.

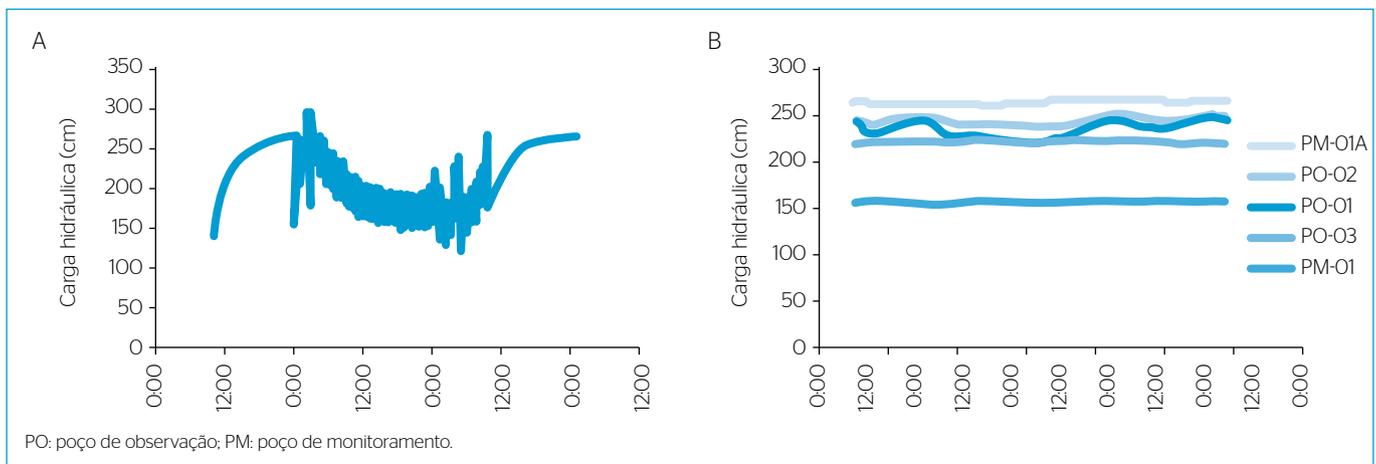


Figura 9 - Resultados de carga hidráulica nos (A) poços de extração, (B) observação e monitoramento na Etapa 1.

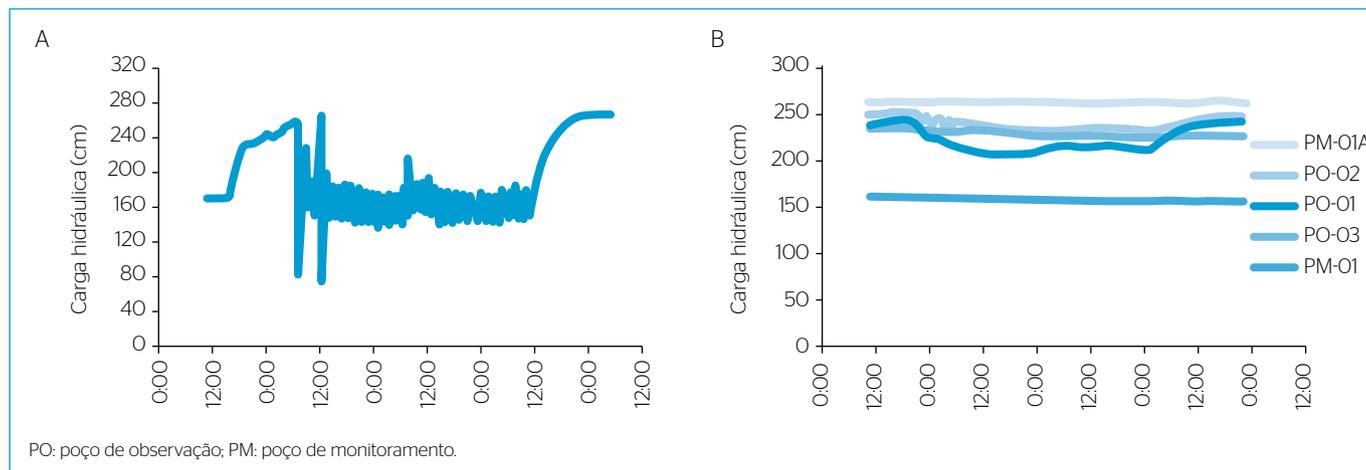


Figura 10 - Resultados de carga hidráulica nos (A) poços de extração, (B) observação e monitoramento na Etapa 2.

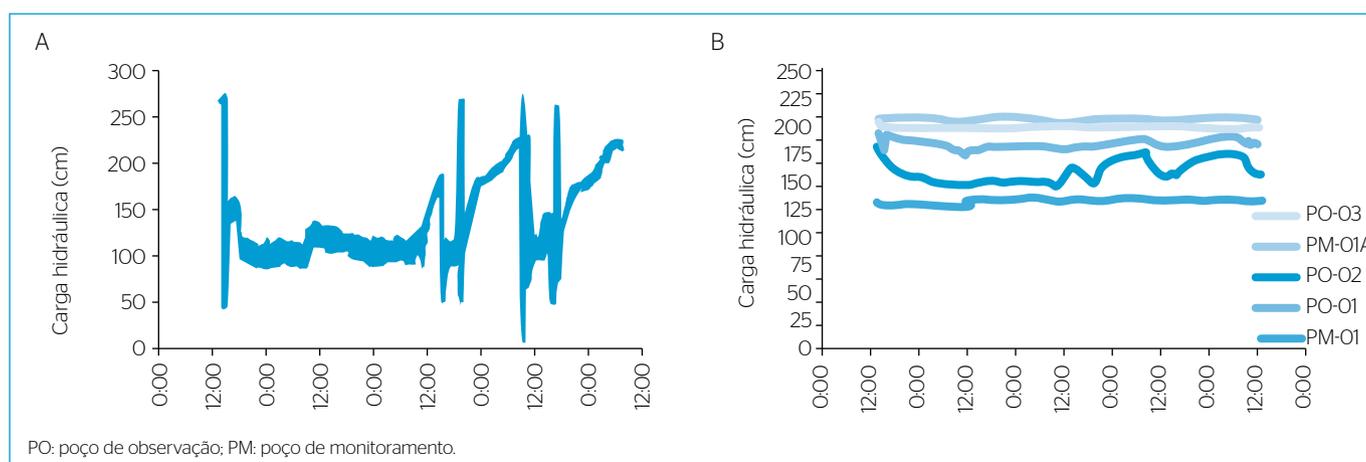


Figura 11 - Resultados de carga hidráulica nos (A) poços de extração, (B) observação e monitoramento na Etapa 3.

Quadro 2 - Resultados consolidados obtidos pelo sistema de remediação com extração multifásica.

Etapa	Parâmetros	Dado estabilizado
1	Vácuo médio no cabeçote do poço PE-01 (mmca)	1.202,00
	Vácuo dos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03/PM-06 (mmca)	930,00/29,50/0,60/0,20/0,50
	Rebaixamento dos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03 (cm) ¹	81,10/41,50/6,70/0,60
	Comprimento final do tubo pescador do poço PE-01 (m) ²	1,35
	Rotação do compressor do sistema MPE (Hz)	22,00
2	Vácuo médio no cabeçote do poço PE-01 (mmca)	2.517,00
	Vácuo nos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03/PM-06 (mmca)	1.778,00/13,50/1,20/0,00/0,00
	Rebaixamento dos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03 (cm) ¹	103,90/30,90/14,70/5,20
	Comprimento final do tubo pescador PE-01 (m) ²	1,65
	Rotação do compressor do sistema MPE (Hz)	26,00
3	Vácuo médio no cabeçote do poço PE-01 (mmca)	3.120,00
	Vácuo nos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03/PM-06 (mmca)	2.296,00/17,40/1,30/0,00/0,00
	Rebaixamento dos poços PE-01/PO-01/PO-02/PO-03 (cm) ¹	158,40/31,60/11,00/1,20
	Comprimento final do tubo pescador PE-01 (m) ²	1,95
	Rotação do compressor do sistema MPE (Hz)	31,00

¹Referência de medição: nível estático antes da partida do sistema MPE; ²referência de medição: piso; PE: poço de extração; PO: poço de observação; PM: poço de monitoramento; MPE: sistema de extração multifásica.

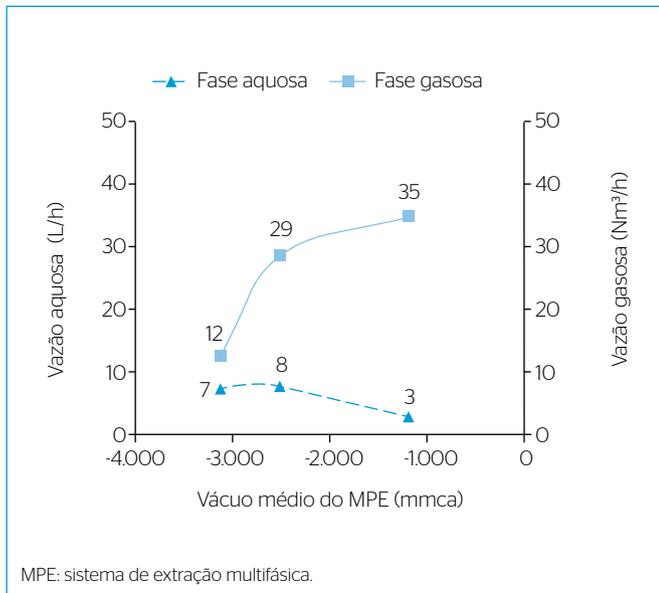


Figura 12 - Resultados das vazões gasosa e aquosa em relação ao vácuo aplicado no sistema de extração multifásica.

Ao longo das etapas deste estudo, o aumento do vácuo no PE pelo sistema MPE não elevou a vazão de extração gasosa, pelo contrário, houve uma redução nos resultados de vazão gasosa. Por sua vez, a vazão de água subterrânea extraída apresentou aumento de 185% da Etapa 1 para a Etapa 2, e pequena redução de 7% da Etapa 2 para a Etapa 3. Conforme já mencionado, alguns fatores podem explicar esse comportamento:

- perdas de carga nas curvas do trajeto da unidade MPE até o PE;
- acúmulo de água na linha de extração em função da formação de pontos baixos, impedindo o fluxo multifásico;
- ocorrência de precipitação pluviométrica no período do estudo, com aumento da umidade do solo, reduzindo a transferência de fluxo da fase gasosa entre os poros do solo.

Principalmente para os cenários de contaminação com compostos orgânicos voláteis, este estudo demonstrou que a simples elevação da pressão de vácuo realizada pelo sistema MPE pode não implicar, necessariamente, em uma maior eficiência do processo de remediação de determinada área, devendo ser realizados estudos preliminares.

CONCLUSÕES

Este estudo permitiu avaliar a influência de diferentes condições de pressão de vácuo na operação de sistema MPE, em escala real, implantado em uma área industrial.

Pelo estudo geoambiental, avaliou-se que o aquífero sob a área de remediação com sistema MPE possui caráter livre, nível d'água médio-raso, sendo constituído predominantemente por aterro siltoarenoso a siltoargiloso depositado sobre um horizonte argiloso. A análise integrada dos resultados obtidos permitiu concluir, principalmente, que:

- o aumento da pressão de vácuo aplicada no PE do sistema MPE não refletiu necessariamente no aumento da vazão gasosa, apenas no volume aquoso extraído;
- para este estudo, a condição operacional mínima de pressão de vácuo aplicada no sistema MPE resultou no maior valor médio de vácuo entre os POs (PO-01 igual a 29,5 mmca). Nesse sentido, apesar da aplicação de maiores pressões de vácuo no sistema MPE nas Etapas 2 e 3 (-2.517 e -3.120 mmca, respectivamente), a influência nos POs foi menor quando comparado com a Etapa 1 (-1.202 mmca);
- em termos de rebaixamento do nível dinâmico de água, constatou-se que o aumento do vácuo aplicado pelo sistema MPE entre as etapas estudadas, com concomitante aumento no rebaixamento do nível de água do PE, influenciou no rebaixamento do nível de água dos POs. Todavia, o maior rebaixamento foi obtido na Etapa 1 (PO-01=41,5 cm), com menor valor de vácuo aplicado (-1.202 mmca).
- os seguintes fatores foram levantados como potenciais justificativas para os comportamentos verificados nas diferentes condições operacionais do sistema MPE:
 - perdas de carga nas curvas do trajeto da unidade MPE até o PE;
 - acúmulo de água na linha de extração em função da formação de pontos baixos, impedindo o fluxo multifásico;
 - ocorrência de precipitação pluviométrica no período do estudo, com aumento da umidade do solo, reduzindo a transferência de fluxo da fase gasosa entre os poros do solo.

Este estudo demonstrou a necessidade e a importância de se avaliar previamente as condições operacionais do sistema MPE antes da implantação da técnica, uma vez que a elevação da pressão de vácuo no PE não implica necessariamente em otimização e aceleração do processo de remediação de determinada área.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2007a) *NBR 15492*: sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT. 31 p.

_____. (2007b) *NBR 15495-1*: poços de monitoramento da água subterrânea em aquíferos granulares. Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro: ABNT. 25 p.

_____. (2008) *NBR 15495-2: poços de monitoramento da água subterrânea em aquíferos granulares. Parte 2: Desenvolvimento*. Rio de Janeiro: ABNT. 24 p.

BALDWIN, B.R.; NAKATSU, C.H.; NEBE, J.; WICKHAM, G.S.; PARKS, C.; NIES, L. (2009) Enumeration of aromatic oxygenase genes to evaluate biodegradation during multi-phase extraction at a gasoline-contaminated site. *Journal of Hazardous Materials*, v. 163, n. 2-3, p. 524-530. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.002>

BOUWER, H.; RICE, R.C. (1976) A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 423-428. DOI: 10.1029/WR012i003p00423

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). (1999) *Manual de gerenciamento de áreas contaminadas*. São Paulo: Projeto CETESB - GTZ.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo/CNPS: Documentos 1*. Brasília: Embrapa.

ESTADOS UNIDOS. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). (1975) Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Washington, D.C. 754 p.

FETTER, C.W. (2001) *Applied hidrogeology*. 4. ed. Nova Jersey: Prentice-Hall.

KHAN, F.I.; HUSAIN, T.; HEJAZI, R. (2004) An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, v. 71, n. 2, p. 95-122. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003>

LU, Z.; ZENG, F.; XUE, N.; LI, F. (2012) Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in organo-mineral particles of alluvial sandy soil profiles at a petroleum-contaminated site. *Science of the Total Environment*, p. 50-57. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.036

SUTHERSAN, S.S. (1996) *Remediation engineering: design concepts*. Geraghty & Miller Environmental Science and Engineering Series. Boca Raton: Lewis.

U.S. ARMY. (1999) *Multi-phase extraction - Engineering and design: EM 1110-1-4010*. Washington, D.C.: US Army.