

## 5

### Conclusões e Sugestões

O objetivo principal desta dissertação foi estudar o comportamento e a mobilidade de um óleo mineral na zona vadosa de um solo arenoso inerte, de modo que, em um segundo momento, se pudesse avaliar a influência do solo e dos microrganismos na mobilidade e na biodegradação deste mesmo contaminante na feição areno-siltosa de um solo residual microbiologicamente ativo.

Para que se atingisse o objetivo supracitado, este trabalho foi dividido em duas etapas, caracterizadas pelo desenvolvimento de metodologias de ensaio e por simulações de contaminação em esferas de vidro e na feição areno-siltosa do solo residual.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas ao longo dos ensaios experimentais e as sugestões para trabalhos futuros levando em conta não só os ajustes necessários a este trabalho como também as idéias que foram surgindo ao longo do mesmo.

#### 5.1.

#### Ensaio com Esferas de Vidro

##### - Conclusões

Nos ensaios com as esferas de vidro, a altura da franja capilar atingiu valores muito elevados não correspondentes aos calculados na teoria através de equações matemáticas.

Comprovada a teoria de que o diâmetro e a altura da coluna não influenciam o comprimento da franja capilar, optou-se por utilizar a coluna de menor diâmetro, uma vez que reproduz com maior precisão uma situação 1D.

O tipo de adensamento foi escolhido muito mais em função da praticidade na montagem dos ensaios do que de uma diferença nos resultados apresentados. O

adensamento das esferas de vidro de uma só vez levou a uma distribuição mais homogênea da água no solo, além de ter apresentado uma franja capilar um pouco menor do que nos outros ensaios de adensamento.

A drenagem natural não se mostrou ideal para este trabalho já que, além de uma franja capilar muito comprida, foram obtidos valores elevados de saturação e de umidade.

A drenagem através da aplicação de sucção na base da coluna mostrou-se bastante eficiente com relação à drenagem da franja capilar do solo. No entanto, houve grandes dificuldades no controle e na repetibilidade da sucção entre ensaios.

Ao realizar a análise estatística não foram encontradas diferenças significativas entre os resultados da drenagem com areia e da drenagem com tubo, ou seja, nos dois tipos de drenagem testados os resultados entre ensaios e entre segmentos de coluna podem ser considerados estatisticamente iguais, provando que há grande repetibilidade nos dois casos. Na prática, a execução dos ensaios de drenagem com areia transmitiu maior segurança e confiabilidade. Foram levados em conta na delimitação da metodologia de ensaio não só os resultados propriamente ditos como também a praticidade, a repetibilidade e o próprio aspecto visual.

O avanço do contaminante se deu relativamente rápido e foi caracterizado pela presença de *fingers*, atingindo aproximadamente 30 cm de profundidade na coluna de solo em 24 horas. A função delimitadora do cap metálico no topo da coluna foi bastante efetiva, evitando a ocorrência do efeito de borda.

A contaminação mais significativa se deu no primeiro segmento das colunas, porém, à exceção deste segmento, o contaminante se distribuiu bem homogeneamente com a profundidade.

De uma maneira geral, os resultados referentes à concentração normalizada de compostos alifáticos e aromáticos sugerem que ambos migraram com uma mesma intensidade. Entretanto, nos dois primeiros segmentos da coluna observou-se uma ligeira mudança em suas proporções com relação a que se encontravam no início do monitoramento, podendo ser um indicativo de que nos segmentos superiores os compostos alifáticos tiveram maior mobilidade do que os aromáticos.

Houve grande repetitividade nos resultados obtidos entre os diferentes ensaios de contaminação, conferindo confiabilidade aos dados apresentados neste trabalho.

### - Sugestões

Como sugestão primeira para trabalhos futuros propõe-se a realização dos mesmos testes de drenagem utilizando material não industrializado, ou seja, apesar de as esferas de vidro possuírem diversas especificações possibilitando inclusive a repetição dos ensaios com esferas de diâmetro maior, acredita-se que possa haver diferenças de comportamento entre o material industrializado e um solo de granulometria equivalente. Portanto, sugere-se inicialmente a utilização de um solo arenoso natural equivalente às esferas de vidro estudadas nesta dissertação de mestrado.

Propõem-se novos testes de drenagem através de ensaios de colunas preenchidas por areia grossa nos dois últimos segmentos, de modo que o dreno natural se encontre no interior da própria coluna. Uma outra sugestão a ser levada em consideração seria a de que este mesmo dreno no interior da coluna fosse composto por duas frações distintas de solos arenosos, indo da mais fina para a mais grossa. Desta forma, a coluna seria preenchida de baixo para cima por uma camada de areia grossa, uma camada de areia média e o material objeto de estudo (solo arenoso ou esferas de vidro).

Em um segundo momento, a fim de verificar a influência da granulometria do meio tanto na drenagem da água quanto na mobilidade do contaminante, sugere-se ainda a repetição dos ensaios de drenagem com areias de diferentes granulometrias.

A avaliação do comportamento e da mobilidade de outros óleos seria enriquecedora, mais ainda se fossem analisados os parâmetros relativos ao transporte de contaminantes em meios porosos.

Sugere-se ainda a execução de ensaios de contaminação com diferentes tempos de duração, maiores e/ou menores do que o intervalo de tempo monitorado neste trabalho. Assim, será possível avaliar a influência do fator tempo no transporte de contaminantes e extrapolar os resultados obtidos para uma situação de contaminação real no campo, de modo que se possa estimar a urgência na

tomada de decisões no sentido de interromper o movimento da frente de contaminação.

Propõe-se a execução de ensaios com diferentes graus de saturação de modo a verificar a influência deste parâmetro na mobilidade do contaminante ao longo da coluna. Caso seja possível, sugere-se a extração das umidades de cada segmento de solo da coluna.

Outra sugestão interessante seria variar o tempo de adensamento das esferas de vidro na coluna de modo a verificar a influência deste fator no peso específico de cada camada de solo e conseqüentemente na descida do contaminante ao longo do monitoramento.

Acredita-se que óleos com composições e viscosidades distintas não tenham comportamentos em meios porosos semelhantes ao óleo utilizado neste trabalho. Propõe-se, portanto, a repetição dos ensaios com mais de um tipo de óleo a diferentes concentrações, no intuito de avaliar a importância de mais este parâmetro na mobilidade do contaminante ao longo da coluna de solo.

Sugere-se ainda em um trabalho futuro a modelagem numérica da contaminação por óleos minerais em solos arenosos inertes através dos dados experimentais obtidos.

## 5.2.

### **Ensaio com Solo Residual Indeformado**

#### **- Conclusões**

A atividade degradadora se deu em ciclos, entre pontos de máximo e de mínimo, em alguns dos segmentos das colunas de solo indeformado, com ou sem refletores.

A presença de refletores, no entanto, estimulou, em um primeiro momento, a atividade enzimática no segmento superior das colunas, se sobrepondo ao efeito da toxicidade do óleo para os microrganismos do solo e levando a valores bastante elevados de atividade. Entretanto, nos outros intervalos de tempo monitorados foram notadas atividades baixas.

A atividade enzimática do segundo segmento das colunas com refletor superou em valores absolutos a das colunas sem refletor, indicando que o aumento

de temperatura teve um efeito positivo no potencial degradador dos microrganismos do solo.

A atividade degradadora mais elevada no terceiro e no quarto segmentos, tanto das colunas com refletor quanto das colunas sem refletor, pode estar diretamente relacionada à menor concentração de contaminante nestes segmentos, representando uma menor toxicidade aos microrganismos e, conseqüentemente, maior susceptibilidade aos processos bióticos de degradação.

A atividade cíclica e mais elevada no terceiro segmento pode estar diretamente relacionada com a biodegradação e com a mobilidade do contaminante entre os segmentos da coluna.

O teor de óleo ao longo do monitoramento oscilou tanto nas colunas com refletor quanto nas colunas sem refletor, representando um provável indicador da ocorrência dos processos de biodegradação.

A mudança na viscosidade do óleo nas colunas sob a influência dos refletores justifica a maior concentração de contaminante nestas colunas. Guardadas as devidas proporções referentes aos intervalos de tempo monitorados, a mobilidade deste óleo na feição areno-siltosa de solo residual indeformado não se deu tão facilmente quanto nas esferas de vidro.

Os resultados da atividade degradadora sugerem que a população microbiana esteve constantemente se adaptando às novas condições de contaminação e de temperatura através da seleção de estirpes mais resistentes e capazes de metabolizar diferentes compostos.

Os processos de biodegradação ocorreram com maior facilidade nos segmentos onde a contaminação não foi elevada e não representou toxicidade para a população microbiana.

A contaminação apresentou uma tendência a se estabilizar no primeiro segmento e a aumentar ligeiramente no segundo segmento no final do monitoramento.

Pelas análises de ressonância magnética nuclear (RMN) verificou-se que a composição do óleo não se alterou consideravelmente com o tempo mantendo, de uma maneira geral, sua proporção inicial. O comportamento dos alifáticos e dos aromáticos seguiu a tendência dos resultados obtidos em termos de hidrocarbonetos totais de petróleo.

Não houve variações significativas nas perdas por volatilização das colunas com e sem refletores. Portanto, contrariando as expectativas, o aumento da temperatura causado pela ação dos refletores não deve ser considerado como um fator de influência.

A tendência de melhor penetração do óleo nas colunas em que houve menor perda de umidade foi verificada tanto nas colunas sob a ação de refletores quanto nas outras colunas, sugerindo que a manutenção da umidade dos solos é um fator de grande relevância na mobilidade de contaminantes através de meios porosos.

### **- Sugestões Solo Residual Indeformado**

As primeiras sugestões para esta parte do trabalho são provenientes de pequenos detalhes na execução dos ensaios que podem eventualmente ser aprimorados, aperfeiçoando, portanto, a metodologia de monitoramento desenvolvida nesta dissertação de mestrado.

Como sugestão primeira, propõe-se a definição prévia de massa de contaminante padrão à qual as colunas serão expostas.

Sugere-se a utilização de um sistema de aquisição de dados que registre leituras de temperatura através de sensores posicionados na superfície de uma das colunas de solo sob a influência dos refletores.

Sugere-se viabilizar a extração da umidade no intuito de permitir uma melhor avaliação da influência deste parâmetro tanto na atividade degradadora quanto na mobilidade do contaminante na coluna de solo indeformado.

Com a finalidade de avaliar isoladamente a volatilização do contaminante nas duas condições de temperatura, propõe-se a realização de um ensaio de monitoramento da massa de óleo ao longo do tempo. Esta proposta pode se dar de maneira simples e efetiva através de recipientes contendo a mesma quantidade de contaminante das colunas de solo. As pesagens destes recipientes devem ser feitas nos mesmos intervalos de tempo em que as colunas forem abertas, no entanto, nada impede que haja pesagens extras. Sugere-se ainda a execução da análise de ressonância magnética nuclear (RMN) do óleo encontrado no topo das colunas nos dias de suas aberturas, a fim de verificar eventuais mudanças na composição do contaminante ao longo do tempo.

Sugere-se que, com base nos dados obtidos a partir da extração de hidrocarbonetos totais de petróleo e das medidas de hidrólise de diacetato de fluoresceína, sejam escolhidas as amostras com maior probabilidade de fornecerem dados relevantes com relação aos compostos aromáticos e alifáticos.

Mais uma sugestão de grande importância seria a execução de medidas ao longo do monitoramento que viabilizem o balanço de massa das colunas de solo indeformado. Sugere-se ainda em um trabalho futuro a modelagem numérica da contaminação por óleos minerais através dos dados experimentais obtidos, levando em conta os processos envolvidos na biodegradação do contaminante.

Em se tratando de colunas de solo indeformado, propõe-se a análise granulométrica e mineralógica de cada uma delas ao final dos ensaios. Desta forma, será possível checar o grau de heterogeneidade entre colunas, já que toda esta etapa do trabalho baseou-se na hipótese de que as colunas eram iguais, reduzindo o número de variáveis envolvidas nos ensaios.

O estabelecimento de uma altura de coluna padrão permitiria uma melhor avaliação dos parâmetros monitorados, visto que por conta da variação da mesma, não há dados suficientes para discutir com segurança os resultados relativos ao quarto segmento das colunas de solo indeformado. Acredita-se ainda que diferentes alturas de colunas possam conduzir a variações nos resultados da atividade microbiana.

Embora não se tenha idéia de como fazê-lo sem impactar a estrutura do solo e a atividade microbiana, sugere-se o desenvolvimento de um método que viabilize a extração de amostras de solo para analisar o comportamento dos microrganismos através de análises de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) no dia de montagem e contaminação das colunas de solo indeformado.

Sugere-se um maior aprofundamento geotécnico através da realização de ensaios de laboratório e da avaliação de parâmetros relativos ao transporte de contaminantes.

Para uma melhor compreensão dos resultados relativos à microbiologia dos solos é de fundamental importância monitorar o comportamento dos microrganismos em solos não contaminados, ou seja, solos controle. Fica como proposta para trabalhos futuros a montagem de conjuntos de colunas: controle e contaminado (sem refletor); e controle e contaminado (com refletor).

Propõe-se a repetição dos ensaios com mais de um tipo de óleo com diferentes concentrações e viscosidades.

A execução de testes de contaminação em colunas submetidas a compactações distintas seria de grande valor para a avaliação da importância de mais um parâmetro geotécnico nestes processos.

Outra sugestão seria, a partir das concentrações de carbono, nitrogênio e fósforo, ajustar a concentração de nutrientes de modo a atingir uma proporção C:N:P ótima. Sugerem-se ainda testes com diferentes proporções C:N:P de modo a verificar a influência da presença de nutrientes nos processos envolvidos na biodegradação do contaminante.

Sugere-se o monitoramento do pH dos diferentes segmentos de solo indeformado da coluna ao longo do ensaio e seu ajuste para valores representativos de pHs ácidos, neutros e básicos, com a finalidade de verificar na prática de que modo estas variações influenciam na biodegradação.

A análise de DNA de amostras de solo permite conhecer as estirpes de microrganismos encontradas no mesmo. Tendo em mãos os resultados das análises de RMN e de DNA seria possível identificar os microrganismos responsáveis pela biodegradação dos diferentes compostos de hidrocarbonetos de petróleo ao longo do monitoramento. Sugere-se a análise inicial dos intervalos de tempo referentes aos picos de atividade degradadora e de concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo.

Como sugestão final para trabalhos futuros propõe-se a execução de ensaios de monitoramento da atenuação natural em uma escala mais representativa da realidade através da análise de blocos de solo indeformados, de onde todas as amostras possam ser extraídas ao longo do monitoramento. Melhor seria se houvesse a oportunidade de desenvolver um trabalho de pesquisa em uma área efetivamente contaminada no campo.