

COMPORTAMENTO DA PERCOLAÇÃO DE POLUENTES HIDROCARBONETOS EM FUNÇÃO DA TEXTURA DO SOLO

Laianne Batista Vieira Fogaça (Universidade de Uberaba, laiannevieira@hotmail.com), Breno França Martins, Lara Letícia Galdino Amorim, Fabrício Pelizer de Almeida.

RESUMO

O petróleo e seus derivados são os maiores pilares da economia mundial. Um de seus subprodutos, a gasolina, bastante utilizada no Brasil como combustível de automóveis, além de eliminar gases do efeito estufa durante sua combustão, pode contaminar solo e água antes mesmo de chegar aos consumidores: durante o transporte. Por meio de oleodutos a gasolina é conduzida das refinarias até os pontos estratégicos de distribuição e comercialização. Ocorrência de vazamentos em oleodutos subterrâneos provoca a contaminação do solo e, dependendo das condições físico-químicas deste, o contaminante sofre percolação, podendo atingir reservatórios subterrâneos e/ou superficiais de água, comprometendo o abastecimento de água potável para as regiões do entorno.

Dado a existência de um mesmo contaminante - a gasolina - diferentes texturas de solo influenciarão na rapidez com que a fluido irá se infiltrar e no tempo gasto para atingir possíveis reservatórios subterrâneos. A literatura afirma que solos arenoso são mais susceptíveis à percolação, principalmente devido à sua granulometria e aos espaços vazios presentes neles. Já os solos argilosos tendem a ser mais resistentes à percolação, portanto conseguem reter o fluido nas camadas superficiais por mais tempo.

O presente trabalho visa quantificar a diferença de tempo gasto por uma mesma quantidade de gasolina para se infiltrar nos solos argilosos e arenosos. Mediante a construção de simuladores de dutos foi observado o comportamento da mancha de contaminação em solos de ambas as texturas e, por meio de ferramentas matemáticas, foram obtidos gráficos que descrevem as diferenças de tempo e, conseqüentemente, a necessidade de se responder de forma mais ou menos urgente conforme o tipo de solo em que foi implantado um oleoduto.

PALAVRAS-CHAVE:

Percolação, Gasolina, Solos, Oleodutos, Contaminação.

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano, observado nas últimas décadas em várias regiões brasileiras é acompanhado de uma expansão do setor de serviços, infraestrutura e das atividades industriais. Percebe-se um aumento gradativo do consumo de recursos naturais, com o intuito de ampliar o portfólio de bens produzidos e abastecer uma crescente população economicamente ativa.

Proporcional ao crescimento das cidades, a utilização de combustíveis tem aumentado significativamente em todo o mundo. Em consequência disto há necessidade de transportar e armazenar estes produtos em pontos estratégicos a fim de facilitar sua comercialização. Daí a necessidade de se construir os *oleodutos*, que de acordo com a Petrobrás (2014), são implantados para fazerem os subprodutos do petróleo chegarem até as refinarias e ajudam na hora de escoar a produção, além de serem alocados, em sua grande maioria, na costa direita do Brasil.

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), em 2012 o consumo de gasolina no país aumentou quase 12%, em relação ao ano anterior. Esse desempenho abrange todas as formas de utilização dos derivados de petróleo, ou seja, não se limita aos combustíveis, compreendendo desde a produção de cosméticos, borrachas, medicamentos, lubrificantes, medicamentos, produtos de limpeza, plásticos e até tecidos sintéticos.

Em suma, o atual modelo de crescimento adotado no planeta é, majoritariamente, dependente da extração, refino e comercialização do petróleo. Diante disso, o monitoramento constante dessas atividades e equipamentos é de fundamental importância, pois a ocorrência de vazamentos em oleodutos pode ser potencialmente perigosa para o meio ambiente,

especialmente em se tratando da gasolina, que possui baixa viscosidade, é bastante solúvel em água e de difícil remoção (CASARINI, 2006).

Na prática, a ocorrência de um vazamento em um oleoduto faz com que o produto ali transportado entre em contato com o solo. A depender da quantidade de combustível, ele tende a escoar verticalmente, atingido camadas mais profundas de solo, podendo chegar até os reservatórios de água subterrâneos. Nos quais a gasolina se dissolve, alterando as propriedades químicas, físicas e biológicas da água, tornando-a imprópria para consumo.

É válido ressaltar que os aquíferos (reservatórios subterrâneos) representam uma fração importante de água doce do planeta e são responsáveis pelo reabastecimento de rios e lagos, além da sua utilização direta pelo homem através da escavação de poços.

Assim, o vazamento de oleodutos em grandes dimensões pode comprometer a qualidade da água a ser utilizada pelos seres vivos, especialmente em se tratando da gasolina. Contudo, é possível prevenir e/ou amenizar estes impactos, na medida em que se conhecem alguns fatores capazes de “frear” o escoamento do contaminante.

Entre estes fatores está a classe textural do solo no qual os dutos serão instalados. A classe textural refere-se inclusive a quantidade de espaços vazios no solo. Estes espaços podem ser compreendidos como o trânsito do líquido poluente, que começa a infiltrar no solo. Assim, parece claro que se o solo possui mais poros, há maior possibilidade de infiltração e escoamento, chegando mais rapidamente aos aquíferos.

Sabe-se que alguns solos são mais eficientes na retenção de fluidos, ou seja, devido sua composição granulométrica e as associações químicas que podem fazer, eles conseguem reter determinadas quantidades de um líquido em sua superfície, pois oferecem uma espécie de barreira que dificulta a percolação do contaminante.

Neste raciocínio, é para se supor, visando à proteção dos aquíferos, que solos arenosos exigem medidas emergenciais mais rápidas que os solos argilosos, na hipótese de ocorrer um sinistro (vazamento) no funcionamento de oleodutos? É possível definir uma função matemática que relacione o tempo de percolação com a profundidade atingida pelo contaminante?

Considerando a ocorrência de um vazamento no transporte de gasolina através de oleoduto, este projeto visa definir o gradiente de solo que apresenta maior urgência na tomada de ações corretivas. Serão analisadas as diferentes apresentações físicas das manchas de contaminação da gasolina, nos solos de textura arenosa e argilosa, e proposto um modelo matemático para esta situação, em função do tempo de percolação do contaminante.

OBJETIVO

Analisar o comportamento da mancha de contaminação no solo e propor um modelo matemático capaz de elucidar a percolação de hidrocarboneto em função de diferentes gradientes texturais em um solo tropical no decorrer do tempo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em detrimento às atividades industriais e aumento do uso de fontes de energia pela população em geral, percebe-se no último século, uma dependência considerável das sociedades quanto aos combustíveis fósseis, especialmente se observarmos a montagem de uma estrutura industrial e de mercado que atenda às demandas mundiais de produtos.

Daí a relevância de estudos que priorizem a avaliação do impacto ambiental nos corpos hídricos, na atmosfera e mais recentemente no solo.

Caracterizando esses materiais é possível identificar que os componentes principais do petróleo é o grupamento hidrocarboneto, composto basicamente de átomos de carbono e hidrogênio ligados entre si. Os hidrocarbonetos são amplamente utilizados no cotidiano para fabricação de plásticos, borrachas, parafina e combustíveis (gasolina, diesel, gás natural).

Esses compostos originam-se de combustíveis fósseis, formados pela decomposição de restos de animais e vegetais a milhões de anos. Eles possuem facilidade de oxidação e capacidade de liberação de muita energia, motivo pelo qual são tão utilizados como combustíveis.

A gasolina é basicamente composta pelos BTEX: hidrocarbonetos monoaromáticos, benzeno, etileno, tolueno, etilbenzeno, além de orto, meta e para xilenos. Estes compostos são muito solúveis em água, tornando a gasolina um potente contaminante de aquíferos, usados como fonte de abastecimento humano. Outro fator que aumenta consideravelmente a solubilidade da gasolina em água é o fato de, no Brasil, a ela ser adicionado o álcool etílico anídrico. De acordo com a Resolução nº 1 de 28/02/2013 do Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool (CIMA) o percentual obrigatório de etanol anidro combustível na gasolina é de vinte e cinco por cento (25%).

Assim, especialmente em sua fase de licenciamento, a implantação de oleodutos deve atentar-se à prevenção e/ou diminuição dos riscos de acidentes. Neste sentido, a textura do solo em que o empreendimento será instalado é um dos fatores que interferem na intensidade do impacto causado em caso de vazamentos do combustível.

Os *solos argilosos* são aqueles com teor de argila superior a 35%, possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água. Ao passo que *solos arenosos* possuem teores de areia superiores a 70% e de argila inferiores a 15%, são permeáveis, leves, de baixa capacidade de retenção de água e, portanto, elevadas perdas por movimentação do fluido (EMBRAPA, 2003). A Figura 1 elucida a classificação do solo conforme sua textura.

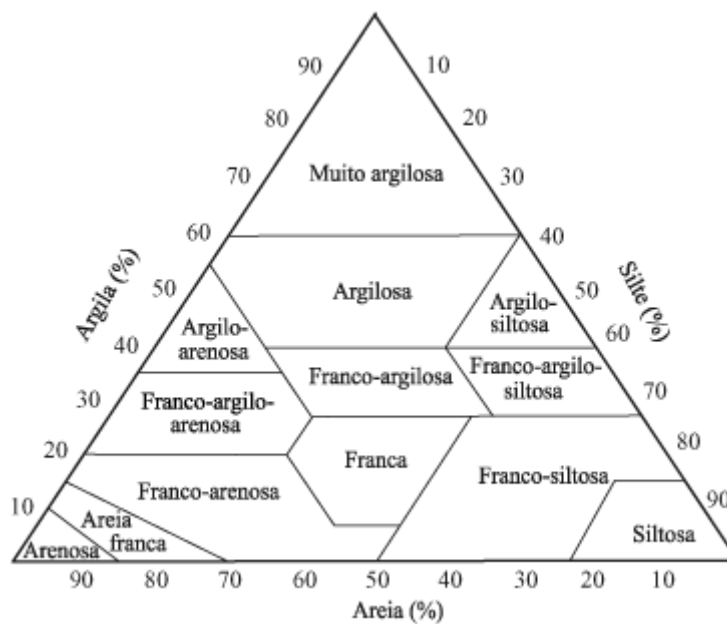


Figura 1: Classificação textural de solo tropical. Fonte: EMBRAPA, 2006.

A classe textural é a característica de maior influência do transporte de substâncias no horizonte de solo. Com a ocupação das lacunas do solo, começa a atingir regiões (horizontes) mais profundas. Assim, se a textura do solo apresenta maior índice de vazios, esta ocupação tende a ser mais rápida, portanto o combustível alcança o reservatório subterrâneo mais rapidamente e inicia-se a interação gasolina-água.

“O termo *percolação* vem do latim *percolatio*, que significa filtragem” (PEREIRA, 2006, p.29), ou seja, refere-se à capacidade do solo permitir o escoamento vertical de um percentual do líquido vazado. Por indução, diz-se que solos com mais espaços vazios (porosos) tendem a segurar menos o líquido, ou seja, permitem que o fluido passe pelo solo mais livremente, ao passo que aqueles cuja porosidade é menor tendem a dificultar o escoamento vertical do contaminante.

Outro agravante da gasolina é a sua variada composição química que favorece o potencial patogênico, pois alguns hidrocarbonetos são facilmente absorvidos pelo organismo humano, tanto pela via oral, quanto respiratória ou dermal, de caráter carcinogênico em múltiplos órgãos humanos e depressantes do sistema nervoso central (CHAKRADEO et al., 1993).

Na iminência do vazamento o líquido entra em contato com o solo e, por forças gravitacionais e interações intermoleculares, ocorrem o transporte do combustível dentro do horizonte do solo, convergindo e interagindo para a água. Estes fenômenos são dependentes de algumas variáveis, tais como, viscosidade do fluido, polaridade, compactação do solo e, principalmente, a sua textura.

Na água a gasolina se dissolverá parcialmente: sua fração de hidrocarbonetos é mais solúvel, devido a polaridade, de modo a alterar as propriedades da água primeiro (CORSEUIL, 1992). A alteração pode ser percebida visualmente, pois a viscosidade da água é aumentada e altera a coloração.

Paralelo a isso, a compactação de um solo arenoso pode torná-lo propício a instalação de oleodutos, pois diminuirá significativamente a velocidade de percolação da gasolina oriunda de um possível vazamento e à medida que este líquido percola pelo solo de maneira lenta, a suas propriedades contaminantes poderão ser atenuadas pelos processos (físicos, químicos e biológicos) de interação com o solo, tais como filtração, difusão, dispersão, diluição, absorção, adsorção, troca iônica e a biodegradação aeróbia e anaeróbia.

Desta forma, considerando-se que uma região na qual se encontra em pleno funcionamento um oleoduto e este sofre, acidentalmente, um vazamento, é relevante saber qual textura de solo confere maior margem de segurança aos reservatórios de água subterrâneos.

Acatando-se o pressuposto de que solos argilosos são mais resistentes à percolação, este projeto visa quantificar esta resistência, comparando-a com solos de textura arenosa.

METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar duas texturas de solo (arenosa e argilosa) quanto à permissividade de percolação de gasolina, angariou-se 24 garrafas de Polietileno de Tereftalato (PETs) – de capacidade de 2 litros cada para simular um duto com coluna de percolação.

A construção das colunas de percolação seguiu as etapas descritas a seguir e os procedimentos foram realizados da mesma forma para todas as colunas, totalizando 8 simuladores.

Como preparação inicial as garrafas escolhidas - que possuíam o mesmo formato - foram lavadas e tiveram seus rótulos retirados. A seguir foram delimitadas as indicações de corte: para a primeira e a segunda garrafa foram iguais, considerando 5,5 cm da base e 12 cm da parte superior (descontando-se a área da tampa). Já para a terceira garrafa foi retirado 5,5 cm de base. Ressaltando que os cortes de todas elas foram realizados acima das delimitações, permitindo uma área para a aplicação de cola e encaixe.



Figura 2: Aplicação da cola e encaixes. Fonte: Autor do Trabalho.

A cola foi aplicada na parte externa das áreas extras de delimitação do corte e foram encaixadas. Após a secagem foi aplicado silicone líquido na parte externa da coluna para vedação. Para evitar a perda de solo durante o experimento, foi

realizado o corte de um pequeno pedaço do Tecido Não-Tecido (TNT), que foi acoplado à saída inferior da coluna com uma liga elástica. Estes processos foram registrados na Figura 2.

Para as texturas de solo as amostras foram montadas nas seguintes proporções: uma com 80% de argila, outra com 80% de areia, de modo que foram obtidas quatro colunas de percolação totalmente preenchidas com solos 80% argiloso e 20% arenoso e outras quatro preenchidas com solos 80% arenoso e 20% argiloso. Além disso, foi cortada a parte superior das garrafas e encaixada nas colunas de percolação, a fim de que a estrutura minimizasse a evaporação da argila dos solos e do líquido contaminante. Os referidos procedimentos são ilustrados ainda na Figura 2.

Após o encaixe da estrutura a mesma foi vedada com fita adesiva transparente, evitando assim a perda de material. O resultado final da montagem é apresentado na Figura 3.



Figura 3: Simuladores de dutos. Fonte: Autor do Trabalho.

Em seguida, pela parte superior do simulador foi despejado lentamente 1000 mL do líquido contaminante em cada uma das colunas, permitindo a observação do comportamento da mancha de percolação durante algumas horas.

Durante a observação da mancha de contaminação, foi anotada a profundidade atingida pelo contaminante a cada intervalo de aproximadamente 3 minutos, pelo período máximo de 140 minutos. Os resultados obtidos foram dispostos em uma tabela e todos os procedimentos possuem registro fotográfico e algumas filmagens.

Assim, observou-se a percolação dos solos argilosos e arenosos, com suas respectivas repetições. Este experimento adotou duas medições de percolação – mínima e máxima – para cada tipo de solo. A percolação mínima foi obtida pela medição da distância da linha de superfície do solo até o menor ponto da mancha de contaminação. E a percolação máxima refere-se à medida de distância entre a linha de superfície do solo até o máximo ponto da mancha de contaminação, visível pelo simulador do duto, como mostrado na Figura 4.

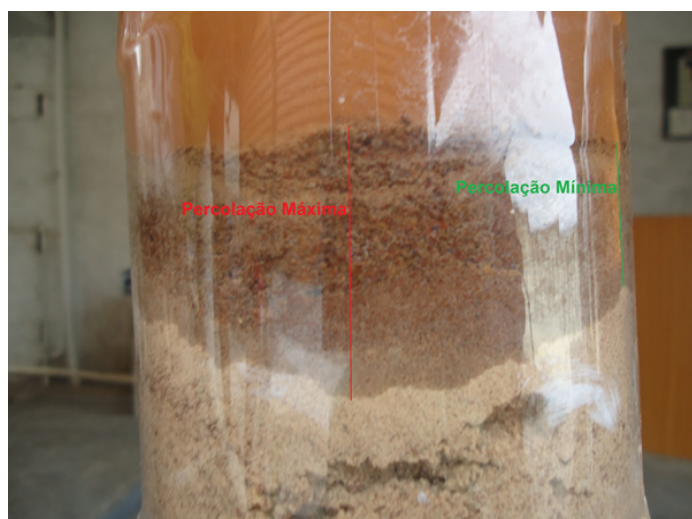


Figura 4: Demonstração da percolação máxima e mínima no simulador. Fonte: Autor do Trabalho.

De posse dos valores de tempo e profundidade atingida e, auxiliados pela ferramenta matemática MINITAB e Excel, obteve-se o gráfico relacionando *profundidade x tempo* de cada textura de solo.

O delineamento experimental foi o de blocos com repetição com 2 tratamentos (solo argiloso e arenoso) e 4 repetições. O teste de Tukey ($p > 0,05$) foi aplicado para as médias observadas para avaliação dos desempenhos de cada solo contaminado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizado o experimento e suas respectivas medições, foram plotados dois gráficos para cada tipo de solo – arenoso e argiloso – a fim de se obter uma melhor visualização dos resultados e as funções matemáticas que descrevessem a linha de tendência da percolação (Figura 5 e Figura 6).

Baseando-se nas Figuras 5 e 6, conclui-se que o solo arenoso necessitou de maior tempo de percolação para atingir uma mesma distância, se comparado ao solo de textura argilosa, ou seja, a argila apresentou maior capacidade de retenção do fluido que a areia. Essa afirmação pode ser bem exemplificada, considerando que para o tempo de 20 (vinte) minutos o solo argiloso teve percolação máxima de 11 cm, enquanto que no solo arenoso foi observado 19 cm de mancha de contaminação para o mesmo tempo.

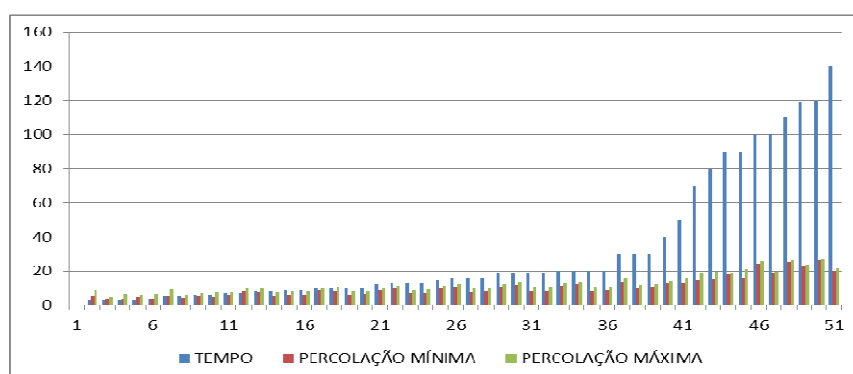


Figura 5: Gráfico de percolação do líquido e tempo gasto para o solo de textura argilosa.

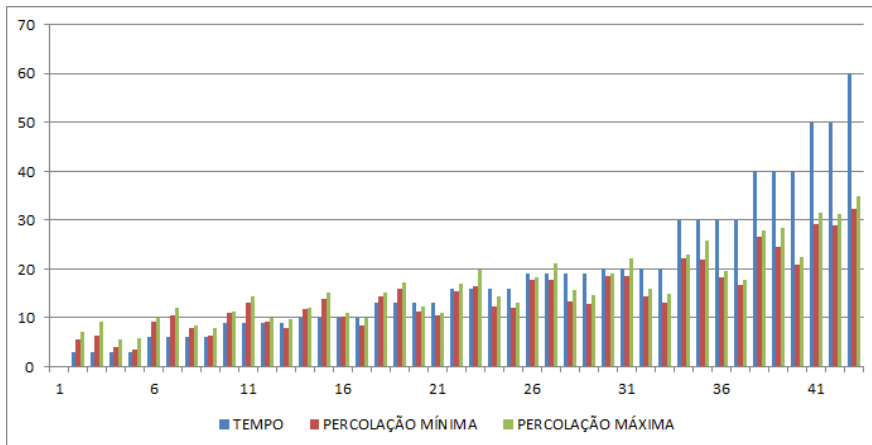


Figura 6: Gráfico de percolação do líquido e tempo gasto para o solo de textura arenosa.

Para o tempo de 40 (quarenta) minutos foi observado a percolação máxima de 18 cm no solo argiloso, enquanto o solo arenoso apresentou 28 cm de percolação. Portanto, foram estimadas equações com base na linha de tendência de cada gráfico. Para a percolação máxima do solo argiloso, foi obtida a representação matemática descrita na equação 1.

$$y = 0,0081t^2 - 0,074t + 6,9355 \quad \text{equação (1)}$$

$$y' = 0,0162t - 0,074$$

$$R^2 = 0,8484$$

A equação 1 refere-se a tendência de percolação máxima do solo argiloso. A segunda equação (y') é a representação matemática da derivada de y em função do tempo, ou seja, é a taxa de variação do líquido. Quanto ao R^2 , este denota ao percentual de ajuste dos valores ao modelo de equação, ou seja, para o R^2 obtido, 84,84% dos dados se ajustam ao modelo de equação proposto.

Para a percolação mínima do solo argiloso, foi estimada a equação 2:

$$y = 0,0083t^2 - 0,083t + 5,0002 \quad \text{equação (2)}$$

$$y' = 0,0166t - 0,083$$

$$R^2 = 0,8492$$

A leitura destas equações segue de modo análogo a anterior, ressaltando-se a proximidade entre os valores de R^2 para ambas percolações, haja visto tratar-se do mesmo solo. Para a mistura de solo arenoso, através do gráfico da Figura 15 também obteve-se a equação 3, referente à percolação máxima:

$$y = 0,0078t^2 + 0,1922t + 6,6862 \quad \text{equação (3)}$$

$$y' = 0,0156t + 0,1922$$

$$R^2 = 0,8072$$

De modo similar, estimou-se a equação 4 para a percolação mínima do solo arenoso.

$$y = 0,0068t^2 + 0,2072t + 5,3987 \quad \text{equação (4)}$$

$$y' = 0,0136t - 0,2072$$

$$R^2 = 0,8092$$

Uma análise comparativa dos valores de R^2 para as duas texturas de solo, permite concluir que os dados se ajustam mais ao modelo argiloso que ao arenoso, numa diferença de 4%. Justifica-se pelo fato de as medições do solo argiloso apresentar menor variação entre as percolações máximas e mínimas e, as medidas foram coletadas em espaços de tempo mais curtos. Os valores medidos nas equações estimadas, os dados foram organizados conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Taxa de Variação do líquido em função da classe textural do solo e o tempo considerado no experimento

t	Solo Argiloso		Solo Arenoso	
	y' (máx)	y' (min)	y' (máx)	y' (min)
3	-0,003	-0,033	0,239	0,248
10	0,088	0,083	0,348	0,343
19	0,234	0,232	0,488	0,466
20	0,250	0,249	0,504	0,479

Ressalta-se, à partir da tabela, que o solo arenoso apresenta maior taxa de variação do que o solo argiloso. Com auxílio do software MINITAB, foi plotado o gráfico de percolação máxima, apresentado na Figura 7. Percebe-se que o solo arenoso atingiu maior percolação em tempo menor, se comparado ao argiloso, conforme a legenda de cores, que indicam a profundidade da percolação. Para a percolação mínima, de ambos os solos, também é confirmada a maior rapidez de percolação do solo arenoso, conforme Figura 12.

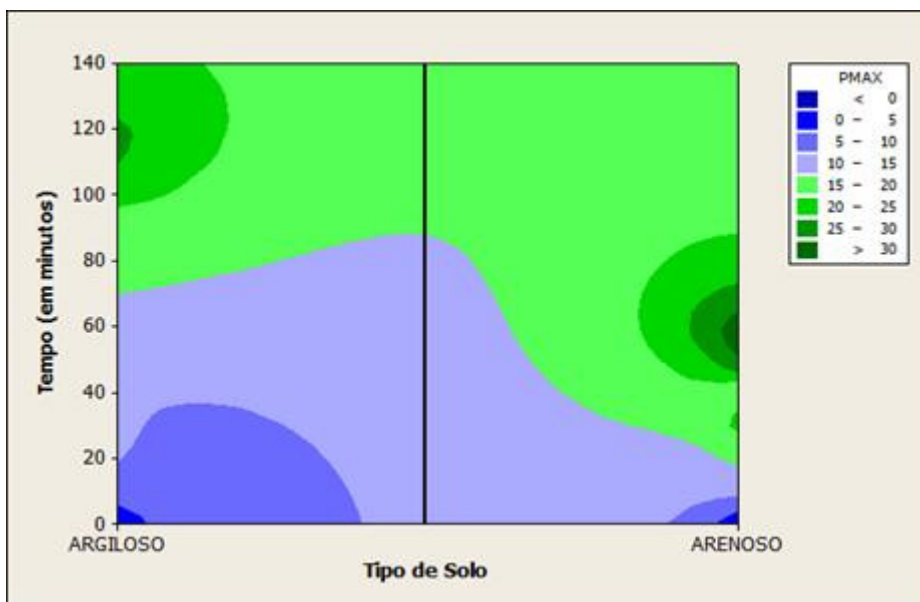


Figura 7: Gráfico 3D de percolação máxima para ambos os solos em função do tempo de observação do experimento.

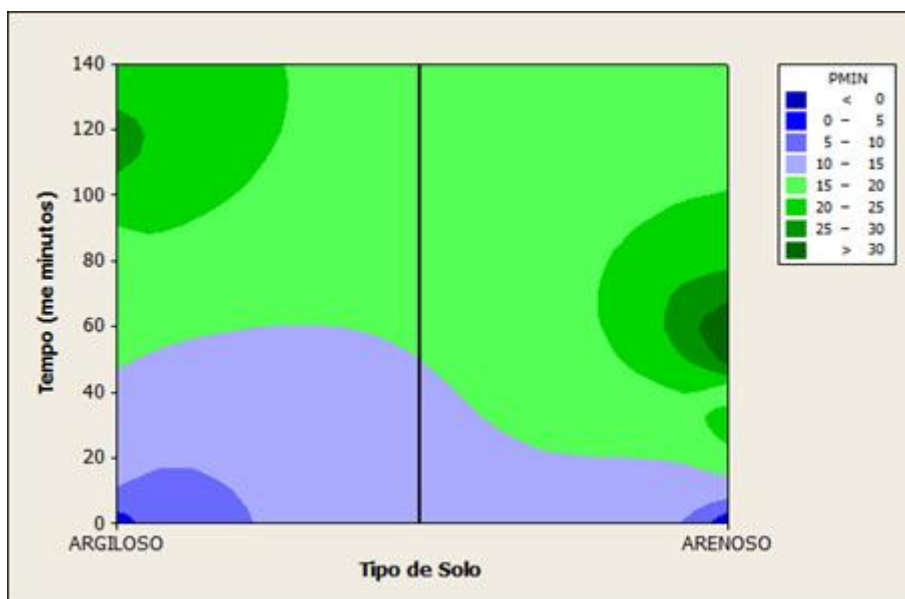


Figura 8: Gráfico 3D de percolação mínima para ambos os solos em função do tempo de observação do experimento.

O Teste de Tukey permitiu uma análise da significância do experimento, ou seja, foi confirmada a diferença estatística significativa entre as texturas de solo. Essa disparidade, no teste, é comprovada pelas letras distintas (*a* e *b*) que indicam a divergência entre as médias, conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Resultado do Teste Tukey¹ para as médias de percolação mínima por tipo de solo considerado no experimento.

Classe Textural do Solo	Médias – Percolação Mínima (em cm)
Arenoso	11,88a
Argiloso	8,01b

¹ Letras iguais indicam que, ao nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias.

Por não haver repetição nas letras, entende-se que todos os parâmetros são divergentes entre os dois solos. Caso contrário, o teste acusaria alguma semelhança à significância 5%.

Quanto aos parâmetros da percolação máxima, foi observada a mesma disparidade que a mínima, com indicação das letras *a* e *b*. Essa divergência pode ser comprovada com a observação da percolação para a distância de 10 cm nos solos: enquanto o arenoso demorou, pelo menos 10 minutos, no argiloso foi preciso aguardar, em média, 15 minutos.

Tabela 4. Resultado do Teste Tukey¹ para as médias de percolação máxima por tipo de solo considerado no experimento.

Classe Textural do Solo	Médias – Percolação Máxima (em cm)
Arenoso	13,59a
Argiloso	9,95b

¹ Letras iguais indicam que, ao nível de 5% de significância, não há diferença entre as médias.

Neste experimento as percolações ocorreram de forma muito rápida, ou seja, se o oleoduto fosse construído nas condições aqui impostas, a contaminação de reservatórios de água seria em um curto espaço de tempo, o que potencializaria largamente suas conseqüências, somado à dificuldade de detecção de um vazamento imediatamente após sua ocorrência.

Na prática, esta situação é um pouco diferente, pois se considera que o sinistro ocorre a uma vazão menor que aquela considerada no experimento, além disso, é obrigatória a instalação de mantas de impermeabilização, que protegem ainda mais o solo. Outro fator limitante é o fato de que mesmo a quantidade de 1000 mL ser considerada grande para a área do

duto, o raio da coluna de percolação não permitia ao solo admitir todo o volume de contaminante simultâneo à sua inserção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O êxito na realização do experimento confirmou que é possível determinar funções matemáticas, cujos gráficos descrevem o comportamento da mancha de contaminação em função da textura do solo ao longo do tempo, desde que seja analisado um mesmo contaminante.

Nas medições efetuadas foi confirmada a maior capacidade do solo argiloso em reter parte da gasolina as camadas mais superficiais. Ou seja, na hipótese de ocorrer um sinistro, o solo arenoso carece de ações emergenciais mais rápidas, se comparado com um solo argiloso, visto que a areia permite que o contaminante infiltre com maior facilidade, podendo atingir reservatórios de água e contaminar uma fração significativa de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRATBERG, D., HOPKINS, L. Risk Based Corrective Action and Risk Assessment Procedures in the United States: a 1995 Survey. In: Proceedings of the 1995 Petroleum Hydrocarbon and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration Conference, Houston, Texas. Nov. p. 25-31.
2. BRUNETTI, G.; PLAZA, C.; CLAPP, C.E. & SENESI, N. Compositional and functional features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA. *Soil Biol. Biochem.*, 39:1355-1365, 2007.
3. CASARINI, D.C.P. Padrões de Qualidade de Solos e Águas Subterrâneas. Anais do Workshop de Biodegradação promovido pela Embrapa, Campinas, 1996.
4. CORSEUIL, H.X. Enhanced Degradation of Monoaromatic Hydrocarbons in Sandy Aquifer Materials by Inoculation Using Biologically Active Carbon Reactors. PhD dissertation, Ann Arbor, MI, EUA, 1992.
5. CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. Dal M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: O problema é grave? *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.2, n.2, p.50-54, 1997.
6. DOMENICO, P. A. e SCHWARTZ, F. W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons Inc., New York, EUA, 2ª Ed.
7. FERREIRA, D. F. Programa computacional SISVAR – UFLA, versão 5.3, 2010.
8. MINITAB Statistical Software VERSION 16 FOR WINDOWS. (2010) Inc. Minitab. Duxbury Press.