

# Determinação experimental da permeabilidade efetiva de fluidos imiscíveis em sistemas bifásicos

Cardoso, L. S. P.  
UFBA/GEOAMB, Salvador, Bahia, Brasil, larissapaes@gmail.com

Machado, S. L.  
UFBA/GEOAMB, Salvador, Bahia, Brasil, smachado@ufba.br

Oliveira, I. B.  
UFBA/DEA, Salvador, Bahia, Brasil, oliveira@ufba.br

De Lima, J. M. A. H.  
UFBA/GEOAMB, Salvador, Bahia, Brasil, joaohubiner@gmail.com

**Resumo:** Este artigo trata da determinação experimental da permeabilidade efetiva de fluidos imiscíveis em sistemas bifásicos, especificamente diesel e água. A técnica adotada foi baseada na metodologia de fluxo em regime permanente. As amostras de solo, após compactação, foram submetidas a valores distintos de grau de saturação pelo fluido molhante (20%, 40%, 60% e 80% de água), passando então a ser percoladas pelo fluido não molhante (diesel) por tempo suficiente para obtenção de condições de fluxo estacionárias. As vazões e gradientes de energia foram controlados, sendo utilizada a lei de Darcy para a obtenção das permeabilidades efetivas do solo ao diesel. Foram realizados, no mínimo três ensaios para cada grau de saturação inicial à água especificado, totalizando em média doze ensaios para cada tipo de solo escolhido. Os resultados experimentais obtidos estão de acordo com o esperado, indicando que o grau de saturação inicial do solo à água representa uma importante influência nos valores experimentais de permeabilidade efetiva do solo ao diesel. A grande vantagem do método empregado reside na sua simplicidade e na não necessidade de se utilizar a técnica de translação de eixos ou medidas de sucção no experimento, por se tratar de fluxo da fase não molhante.

**Abstract:** This article deals with the experimental determination of the effective permeability of immiscible fluids in biphasic systems, specifically diesel and water. The technique adopted was based on methodology in steady flow. Soil samples, after compaction, were subjected to different values of degree of saturation by the wetting fluid (20%, 40%, 60% and 80% water), then going to be percolated by the non-wetting fluid (diesel) long enough time to achieve steady flow conditions. The flow rates and energy gradients were controlled, using the Darcy's law to obtain the effective permeability of the soil to diesel. Were performed, at least three experiments for each initial degree of saturation of soil to water specified, totaling twelve samples for each soil type chosen. The results are in agreement with the expected, indicating that the initial degree of saturation of soil to water is an important influence on the experimental values of effective permeability of the soil to diesel. The great advantage of the method employed lies in its simplicity and no need to use the technique of translation of axes or measures of suction in the experiment, because it is non-wetting phase flow.

**Palavras-chave:** Transporte de poluentes imiscíveis, permeabilidade efetiva.

**Keywords:** Transport of immiscible pollutants, effective permeability.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem surgido um grande interesse no estudo do fluxo não só de água no solo, mas também de outros fluidos que possam ser derramados no terreno, comprometendo a

integridade do solo e dos corpos hídricos. Na ocorrência de derramamentos, o contaminante passará a se mover pelo solo, na direção do lençol freático. São diversos os fenômenos envolvidos no transporte de fluidos imiscíveis através do solo, sendo difícil idealizar a maneira de como essas

substâncias se mobilizam e o que acontece no decorrer desta mobilização. Diversos modelos matemáticos têm sido propostos com o objetivo de prever o comportamento desses fluidos no solo, no entanto, para que esses modelos sejam validados, é necessário a utilização de dados experimentais.

A permeabilidade intrínseca  $K$  [ $L^2$ ], conforme apresentado na Equação 1, proposta por Nutting (1934), é normalmente utilizada para, a partir de um valor de permeabilidade obtido para um determinado fluido, se prever o valor de permeabilidade que seria obtido com um segundo fluido, de densidade e viscosidade diferentes do primeiro.

$$k = \frac{K \times \rho \times g}{\mu} \quad (1)$$

Na Equação 1,  $k$  [ $LT^{-1}$ ] é o coeficiente de permeabilidade;  $g$  é a constante de aceleração da gravidade, com dimensão [ $LT^{-2}$ ];  $\rho$  a densidade do fluido, de dimensão [ $ML^{-3}$ ] e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido, com dimensão [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]. A permeabilidade intrínseca mede a habilidade do meio poroso em permitir o escoamento de fluidos através de seus poros, portanto é uma característica supostamente inerente ao meio, independente do fluido que o atravessa e de suas propriedades. Para meios granulares a permeabilidade intrínseca pode ser considerada uma propriedade exclusiva do meio poroso, podendo ser obtida através da Equação 1. No entanto, nos minerais argílicos não se verifica a independência da permeabilidade intrínseca com o líquido permeante, devido ao excesso de cargas elétricas na superfície do mineral e a sua grande superfície específica, o que faz com que os fenômenos de interação elétrica fluido/sólidos tenham grande influência na permeabilidade. Este fato foi verificado experimentalmente por alguns pesquisadores (Brown & Anderson, 1983; Brown & Thomas, 1984; Fernandez & Quigley, 1985; Schramm *et al.*, 1986; Oliveira, 2001). O coeficiente de permeabilidade do solo, portanto, depende tanto das propriedades do solo, quanto do fluido. Vale ressaltar contudo, que mesmo que se admita a validade do conceito de  $K$ , no caso de solos cujos poros estejam sendo ocupados por mais de um fluido, a presença de uma das fases interferirá no escoamento das outras fases presentes e vice-versa. Assim, o escoamento de cada fase será influenciado tanto pelo meio (permeabilidade intrínseca) quanto pela presença das outras fases (permeabilidade relativa) (Mendonça, 2003). A permeabilidade relativa ( $K_r$ ) é uma grandeza adimensional, definida como sendo a razão entre a permeabilidade efetiva  $K_i$ , com dimensão [ $L^2$ ], correspondente a um dado grau de saturação e uma permeabilidade base, por exemplo, a permeabilidade intrínseca no estado saturado com relação ao fluido de interesse.

$$K_r = \frac{K_{i(S<100\%)}}{K} \quad (2)$$

A permeabilidade efetiva  $K_i$  [ $L^2$ ] é uma medida da capacidade que o solo possui de conduzir um fluido que ocupa apenas parte do espaço poroso, estando o resto ocupado por outros fluidos imiscíveis, e difere da permeabilidade intrínseca pelo fato desta última depender, em teoria, unicamente das propriedades do solo, e não do conteúdo da fase fluida de interesse contida no interior dos seus vazios.

Conforme Demond (1988), predições precisas da permeabilidade efetiva em relação a determinados fluidos são requeridas para uma variedade de processos da indústria petrolífera. Ocorre fluxo simultâneo de gás, água e óleo nos processos relacionados à extração de petróleo, principalmente na recuperação eficiente do óleo, e quando há transporte de algum poluente derivado do petróleo na zona não saturada do solo (Parker, 1989; Delshad e Pope, 1989; Dicarilo *et al.*, 2000).

A Equação 2 pode ser particularizada para um fluido qualquer, fazendo-se referência ao seu coeficiente de permeabilidade. Desta forma tem-se:

$$K_r = k_r = \frac{k_{i(S<100\%)}}{k_{sat(i)}} \quad (3)$$

O índice  $i$  das Equações 2 e 3 é utilizado para se fazer referência à fase de interesse.

Com a introdução do conceito de permeabilidade relativa ( $K_r$ ), a extensão da Lei de Darcy para o fluxo multifásico fica:

$$Q_i = \frac{K_{ri} \times K \times \rho_i \times g \times A \times \Delta h_i}{\mu_i \times L} \quad (4)$$

Na Equação 4,  $Q$  é vazão do fluido  $i$ , de dimensão [ $L^3T^{-1}$ ];  $\Delta h_i$  é a diferença de energia total no fluido considerado, [ $L$ ];  $K$  é o coeficiente de permeabilidade intrínseca do meio, [ $L^2$ ];  $g$  a constante de aceleração da gravidade, [ $LT^{-2}$ ];  $\mu_i$  a viscosidade do fluido  $i$ , com dimensão [ $ML^{-1}T^{-1}$ ];  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova, [ $L^2$ ];  $L$  o comprimento do corpo de prova, [ $L$ ] e  $\rho_i$  a densidade do fluido, com dimensão [ $ML^{-3}$ ].

A determinação da permeabilidade efetiva é feita em laboratório e os resultados são apresentados em função da sucção matricial, da umidade volumétrica, ou do grau de saturação. Em alguns casos um dos fluidos permanece imóvel, em outros há fluxo simultâneo de dois ou três fluidos. Grande parte das metodologias utilizadas tem como base o fluxo no regime permanente. Conforme Bear (1972), a maioria dos métodos descritos na literatura se apoia

essencialmente no mesmo procedimento de ensaio. Em um ensaio típico, dois ou três fluidos são injetados de forma simultânea ou não, em velocidades ou pressões constantes por períodos de tempo consideráveis, até se atingir o equilíbrio, isto é, estabelecendo a condição regime permanente. A condição de regime de fluxo permanente é alcançada dentro de duas a quarenta horas, sendo que o tempo depende da permeabilidade da amostra de solo e do método de ensaio empregado. As saturações, vazões e gradientes de pressão são medidos, sendo utilizada a lei de Darcy para a obtenção das permeabilidades efetivas de cada fluido.

Muitos métodos também utilizam o princípio de Hassler, onde a característica principal do aparato experimental é o controle da pressão capilar em ambos os lados da amostra (no topo e na base). Neste método, a amostra de solo a ser testada é colocada entre duas membranas, ou placas porosas, que são permeáveis só ao fluido molhante. Estes elementos permitem a manutenção de uma saturação uniforme ao longo do corpo de prova, à baixas taxas de fluxo. Esta metodologia também permite medidas de pressão separadas em cada uma das duas fases (Bear, 1972).

Este trabalho trata da determinação experimental da permeabilidade efetiva do diesel em amostras de solo submetidas a valores distintos de graus de saturação em relação à água (20%, 40%, 60% e 80%), após compactação, utilizando permeâmetro de parede rígida. A técnica adotada foi baseada na metodologia de fluxo em regime permanente e apresenta como vantagem a não necessidade de se realizar medidas de sucção no experimento, por se tratar de fluxo da fase não molhante (diesel).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 *Preparação das Amostras*

Foram escolhidos para a realização dos experimentos de permeabilidade efetiva solos de três formações características do Recôncavo do Estado da Bahia e Região Metropolitana de Salvador, sendo elas:

- Sedimentos terciários da formação Barreiras, constituídos por sedimentos areno-argilosos com argilas caulínicas (bilaminares, não expansivas), tendo sido amostrados na região do CIA, Salvador;
- Solos residuais granulíticos oriundos da alteração do embasamento cristalino, com característica argilosa, coletados no regolito do fundo da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador (BA);
- Sedimentos da formação Ilhas, constituídos de argilas trilaminares expansivas (massapê),

coletados na cidade de Santo Amaro da Purificação, Bahia.

Utilizou-se amostras compactadas na densidade média de campo para a realização dos experimentos propostos nesse trabalho. A densidade média foi obtida a partir de amostras indeformadas que foram retiradas em campo. Para a compactação dos solos, as amostras foram destorroadas, homogeneizadas, quarteadas, passadas na peneira #4 (4,76 mm) e armazenadas em local apropriado.

Após essa preparação inicial, a fim de garantir a densidade média de campo na confecção dos corpos de prova para a realização dos experimentos, foram feitos alguns testes para definir o grau de saturação ( $S_r$ ) a ser adotado na compactação das amostras para cada um dos solos. Esses testes tiveram o objetivo de definir um valor mínimo de grau de saturação em relação à água durante o processo de compactação, no qual os corpos de prova, depois de confeccionados, se mantivessem com uma coesão mínima de modo que não se fragmentassem ou apresentassem trincas ao serem manejados durante o processo de secagem das amostras que foram utilizadas na realização dos ensaios de permeabilidade efetiva ao diesel com os corpos de prova com baixos valores de graus de saturação em relação à água. Os corpos de prova foram então compactados com diversos graus de saturação em relação à água (10, 20, 30 e 40 %), em um molde bipartido. Inicialmente a massa de solo, calculada a partir da densidade média de campo e do volume do molde bipartido, foi levada a estufa a 110° C, por 24 horas. Em seguida foi acrescentado o volume de água correspondente ao grau de saturação desejado na massa seca de solo, onde a mistura foi homogeneizada, acondicionada em saco plástico cuidadosamente fechado e identificado, por 24 horas para garantir o equilíbrio da massa total de solo quanto à umidade. Após esse tempo de espera, os corpos de prova foram então compactados no molde bipartido, sendo que após a compactação o molde foi aberto e, para cada tipo de solo, foi escolhido um grau de saturação mínimo, no qual os corpos de prova se mantivessem intactos e visivelmente sem trincas. Os graus de saturação ( $S_r$ ) mínimos atingidos nos solos da formação Barreiras, regolito e massapê foram: 20%, 10% e 40%, respectivamente. Estes valores de grau de saturação foram então utilizados na confecção dos corpos de prova para a realização dos ensaios de permeabilidade efetiva ao diesel.

### 2.2 *Ensaio de Caracterização*

Os ensaios de caracterização geotécnica visaram a obtenção de índices físicos que influenciam no fluxo de contaminantes no meio poroso. Dentre estes parâmetros-índices que foram determinados temos: massa específica dos sólidos, curva granulométrica e limites de Atterberg.

Todos os ensaios foram realizados seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) indicadas a seguir:

**Tabela 1.** Normas utilizadas na realização dos ensaios.

Norma	Descrição do Ensaio
NBR 6457/1986	Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
NBR 6508/1984	Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação de massa específica
NBR 7181/1984	Análise granulométrica
NBR 6459/1984	Solo – Determinação do limite de liquidez
NBR 7180/1984	Solo – Determinação do limite de plasticidade

### 2.3 Determinação da Curva Característica de Sucção

Estes ensaios foram realizados em equipamento desenvolvido por Machado & Dourado (2001), baseado na metodologia proposta por Fourie & Papageorgian (1995). O aparato experimental é constituído por câmaras de sucção, medidores de variação de volume, sistema de drenagem e aplicação de pressão e um sistema de aquisição de dados. Para a realização deste ensaio, amostras do solo são colocadas na câmara de sucção e saturadas. Em seguida a câmara é fechada e a pressão de ar aplicada no topo da célula. No início, com todos os registros fechados, não há fluxo pelo sistema, sendo registrado um aumento na pressão de água, que se estabiliza em um valor igual ao valor da pressão de ar aplicada. Após a estabilização da pressão, os registros são abertos para permitir a drenagem de um certo volume de água do corpo de prova. Em seguida, após o fechamento dos registros, a pressão de água torna a variar, atingindo, nos estágios subsequentes, valores de pressão de equilíbrio decrescentes (aumento da sucção). Ao final de cada estágio se conhece a sucção na amostra e ao iniciar um novo estágio sabe-se o volume drenado, no entanto não se tem a quantidade de água existente na amostra nestas etapas. Como a amostra deve ser pesada e levada a estufa ao final do ensaio, pode-se determinar o volume de água existente no último estágio de sucção. O volume de água na amostra em cada etapa, é então determinada somando o volume de água drenado com o volume de água existente na amostra na etapa seguinte, e como o volume de água ao final do ensaio é conhecido se pode determinar a umidade da amostra nos estágios intermediários.

Os dados de sucção x umidade volumétrica obtidos foram ajustados pelo modelo empírico de Van Genuchten (1980), apresentado na Equação 5, utilizando-se a relação fixa entre  $m$  e  $n$ , mostrada na Equação 6.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \psi|^n]^m} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$

Nas Equações 5 e 6,  $m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste dos dados experimentais;  $\psi$  é a sucção [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ];  $\theta$  é a umidade volumétrica;  $\theta_s$  é umidade volumétrica quando o solo está saturado;  $\theta_r$  é umidade volumétrica residual e  $\alpha$  [ $\text{M}^{-1}\text{LT}^2$ ] é o parâmetro de ajuste que está relacionado com o valor da pressão de entrada de ar no solo.

### 2.4 Determinação Experimental da Permeabilidade Efetiva

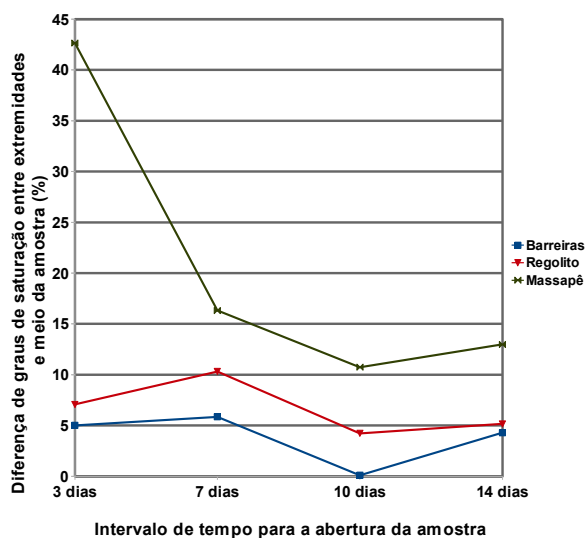
A técnica experimental adotada foi baseada na metodologia de fluxo em regime permanente, onde, neste caso específico, esperou-se que um dos fluidos permanecesse naturalmente imóvel (água) enquanto que o diesel foi então injetado, através de uma pressão constante. Para tanto, as amostras de solo das três formações escolhidas, após compactação, foram submetidas a valores distintos de grau de saturação pelo fluido molhante (20%, 40%, 60% e 80% de água), passando então a ser percoladas pelo fluido não molhante (diesel) por tempo suficientemente longo para obtenção de condições de fluxo estacionárias, cujo critério foi determinado pela obtenção de vazão constante sob condições de contorno constantes. As vazões e gradientes de energia foram medidos e controlados, sendo utilizada a lei de Darcy para a obtenção das permeabilidades efetivas do óleo diesel.

Para tentar garantir uma distribuição de água razoavelmente uniforme através dos poros das amostras de solo, foram realizados alguns testes com os três tipos de solo. Esses testes consistiram na compactação dos corpos de prova, inicialmente secos em estufa, com um valor de densidade similar ao do solo natural. Após a compactação dos corpos de prova, foi adicionada uma quantidade de água com o objetivo de garantir um grau de saturação de 60%. A massa de água acrescentada, foi dividida em duas partes, para que fosse adicionado metade do volume através da base e metade através do topo das amostras. Foram compactados um total de oito corpos de prova de cada tipo de solo. Após a adição de água, os permeâmetros foram fechados e deixados em repouso, por um período de 3, 7, 10 e 14 dias, utilizando-se dois corpos de prova de cada tipo de solo, para cada período de tempo de repouso. Após cada período de espera, os permeâmetros foram abertos, as amostras então foram extraídas e divididas em três partes aproximadamente iguais (duas partes correspondentes às extremidades e uma correspondente à parte central) para a determinação da umidade. A partir dos valores de umidade

encontrados, foram calculados os graus de saturação correspondentes a cada parte das amostras.

O gráfico da Figura 1 apresenta uma síntese dos resultados dos testes realizados. Para a construção do gráfico, calculou-se a média aritmética dos graus de saturação correspondentes às extremidades dos dois corpos de prova utilizados para cada período de repouso e deste resultado, subtraiu-se o valor da média aritmética dos graus de saturação correspondentes à parte central dos mesmos corpos de prova.

Conforme se pode observar no gráfico da Figura 1, para maioria dos casos, a diferença de graus de saturação entre a média das extremidades e da parte central das amostras de solo tende a diminuir com o aumento do intervalo de tempo para abertura dos permeâmetros, ou seja, a distribuição de água através dos poros das amostras de solo tende a ficar razoavelmente uniforme com o passar do tempo.



**Figura 1.** Média da diferença de graus de saturação entre extremidades e parte central dos corpos de prova de solo em função do intervalo de tempo esperado para a abertura dos permeâmetros.

Com esses resultados, após a compactação das amostras, quando necessário, uma quantidade de água complementar, previamente calculada, foi adicionada de modo a atingir outros valores de graus de saturação nas amostras (20%, 40%, 60% e 80%). A massa de água adicional correspondente a cada grau de saturação desejado, foi dividida em duas partes e adicionadas de modo idêntico ao que foi descrito anteriormente. Após a adição de água, os permeâmetros foram fechados e deixados em repouso, por um período mínimo de 30 dias, para garantir o equilíbrio dos valores de graus de saturação à água ao longo dos corpos de prova. Além do intervalo de 30 dias de repouso, as massas dos conjuntos formados por permeâmetro, amostra de solo compactado e água, eram periodicamente determinadas afim de se verificar se havia alguma

perda de massa de água por evaporação, concluindo-se, ao final, que a alteração de massa encontrada era desprezível.

Em relação ao solo massapê, como o mesmo foi compactado com 40% de grau de saturação em relação à água, não foi possível realizar os ensaios em amostras com 20% de grau de saturação. Então, para este caso, após a preparação das amostras, as mesmas foram deixadas secando ao ar livre durante um período de tempo suficientemente longo para que atingissem a umidade higroscópica. Durante este processo de secagem ao ar livre, as amostras apresentaram retração por se tratar de um solo argiloso, então para evitar caminhos preferenciais de fluxo durante a realização dos ensaios de permeabilidade, foi utilizada resina para laminação de endurecimento a frio para o preenchimento do espaço anelar formado entre o solo e a parede interna do permeâmetro de parede rígida. O grau de saturação foi calculado a partir do valor de umidade higroscópica e o ensaio de permeabilidade efetiva do óleo diesel foi então realizado para este grau de saturação em relação à água.

Foram realizados no mínimo três ensaios para cada grau de saturação especificado (20%, 40%, 60% e 80%), totalizando doze ensaios para cada tipo de solo.

É válido ressaltar que todos os ensaios foram realizados dentro de uma capela com exaustão, onde os vapores orgânicos foram direcionados para um filtro com carvão ativado, minimizando assim a sua incidência no Laboratório, conforme Figura 2. Como neste ensaio trabalhou-se com diesel foi necessário utilizar uma garrafa plástica conectada à saída do corpo de prova (Figura 3), para coletar o volume percolado, afim de minimizar as perdas do combustível por volatilização. Em intervalos de tempo aproximadamente constantes, a garrafa plástica era desconectada do permeâmetro e pesada em balança de precisão. Posteriormente, para se obter o volume de combustível percolado, bastou dividir a massa obtida em cada determinação pela densidade do combustível à temperatura ambiente. A partir do volume de efluente coletado, foi calculada a permeabilidade.

Durante a realização de todos os ensaios nos três tipos de solo (Formação Barreiras, regolito e massapê), com os diversos graus de saturação em relação à água, não foi observada a presença de água nas garrafas utilizadas para coletar o volume percolado de óleo diesel, podendo-se de fato considerar a mobilidade da água, durante a realização dos ensaios, praticamente nula ou desprezível.



**Figura 2.** Capela com exaustor para realização dos ensaios com combustível.



**Figura 3.** Garrafa plástica na saída da câmara para coletar o volume percolado.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISES

Na tabela 2 a seguir, é apresentado a média dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados nas amostras deformadas das três formações escolhidas. Foram realizados doze ensaios de cada tipo para cada formação escolhida.

A tabela 3 apresenta os parâmetros empregados no ajuste das curvas características de retenção aos dados experimentais.

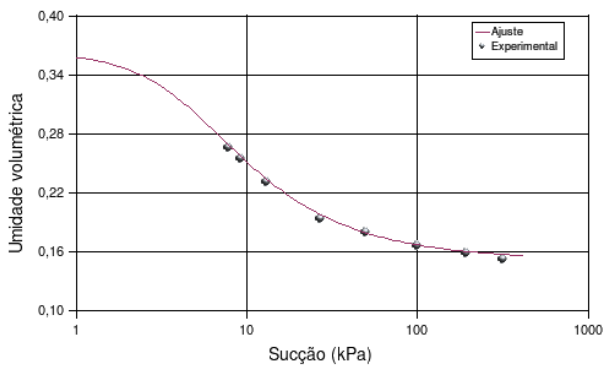
**Tabela 2.** Média dos resultados dos ensaios de caracterização para as três solos escolhidos.

Identificação do solo	Ensaio de granulometria (%)						Limites de consistência			Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	SUCS
	Ped.	A.G.	A.M.	A.F.	Silte	Arg.	WL	WP	IP		
Barreiras	0	20,33	39,17	10,42	2,42	27,5	41,78	20,27	2,67	2,67	SC
Regolito	1,42	7,67	10,92	7,25	27,58	45,17	65,49	37,99	27,5	2,78	MH
Massapê	0	1,08	5,42	6,92	17	69,42	83,15	38,28	44,88	2,75	MH-CH

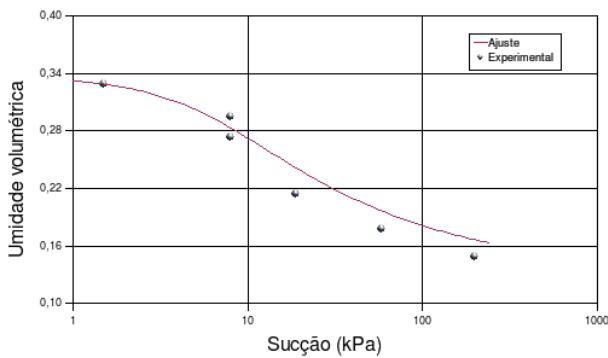
**Tabela 3.** Parâmetros de ajuste das curvas características de retenção de água.

Identificação do solo	$\theta_r$	$\theta_s$	$m$	$n$	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$k_{sat}(água)$ (cm/s)
Barreiras (1)	0,15	0,36	0,46	1,86	0,21	3,18E-006
Barreiras (2)	0,13	0,34	0,34	0,15	0,16	3,18E-006
Barreiras (3)	0,1	0,32	0,31	0,15	0,32	3,18E-006
Barreiras (4)	0,1	0,39	0,53	2,11	0,05	3,18E-006
Média	0,12	0,35	0,41	1,73	0,19	3,18E-006
Regolito (1)	0,19	0,47	0,12	1,13	0,28	5,54E-006
Regolito (2)	0,22	0,53	0,1	1,12	0,76	5,54E-006
Regolito (3)	0,22	0,52	0,15	1,81	0,49	5,54E-006
Regolito (4)	0,15	0,46	0,09	1,1	0,19	5,54E-006
Regolito (5)	0,22	0,52	0,1	1,11	0,42	5,54E-006
Regolito (6)	0,2	0,49	0,13	1,15	0,34	5,54E-006
Regolito (7)	0,16	0,45	0,1	1,11	0,16	5,54E-006
Regolito (8)	0,2	0,49	0,09	1,1	0,33	5,54E-006
Média	0,2	0,49	0,11	1,12	0,37	5,54E-006
Massapê (1)	0,2	0,52	0,15	1,18	0,31	1,44E-008
Massapê (2)	0,2	0,53	0,16	1,19	0,15	1,44E-008
Média	0,2	0,53	0,15	1,18	0,23	1,44E-008

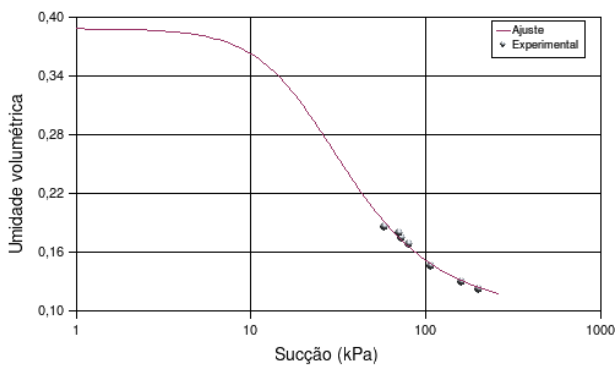
As figuras 4 a 10 apresentam as curvas características obtidas para os solos ensaiados.



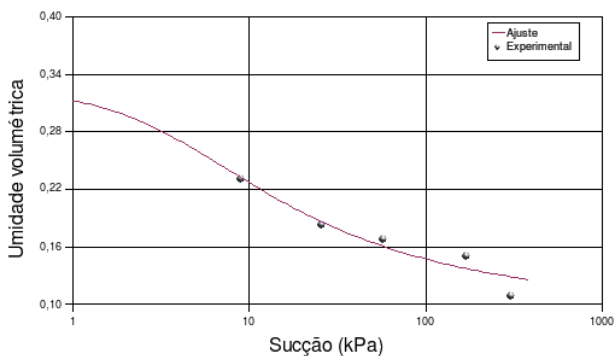
**Figura 4.** Curva característica obtida para o solo sedimentar da formação Barreiras (1).



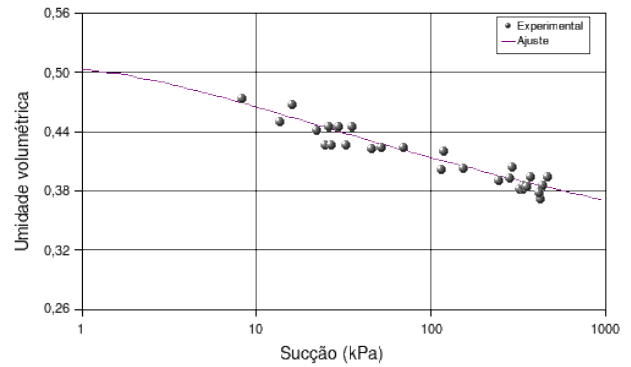
**Figura 5.** Curva característica obtida para o solo sedimentar da formação Barreiras (2).



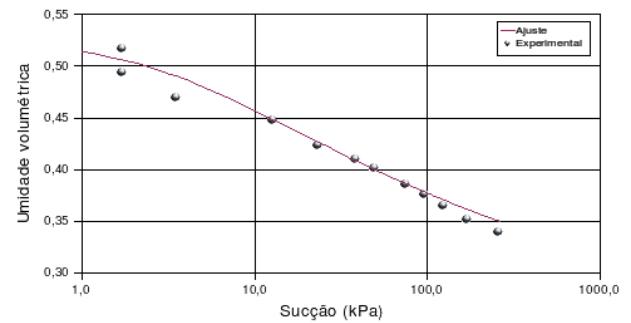
**Figura 6.** Curva característica obtida para o solo sedimentar da formação Barreiras (3).



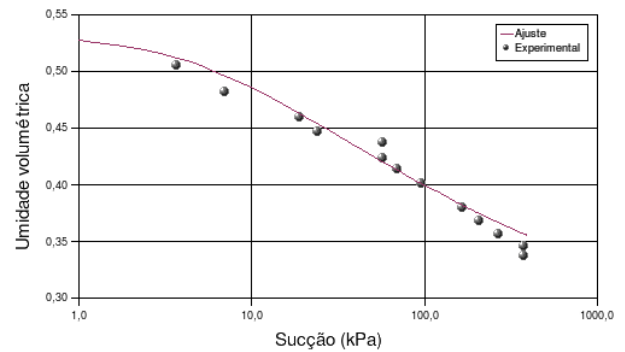
**Figura 7.** Curva característica obtida para o solo sedimentar da formação Barreiras (4).



**Figura 8.** Curva característica média obtida para o solo residual maduro do granulito/gnaiss (regolito).



**Figura 9.** Curva característica obtida para o Massapê (1).



**Figura 10.** Curva característica obtida para o Massapê (2).

Conforme apresentado nos gráficos, em comparação com as amostras da formação Barreiras e do solo granulito (regolito) ensaiadas, as amostras de Massapê apresentam maior capacidade de retenção de água, em concordância com a grande quantidade de argilo-minerais de alta atividade encontrada neste solo.

A tabela 4 apresenta a média dos índices físicos iniciais dos corpos de prova compactados e as tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados dos ensaios realizados para a determinação da permeabilidade efetiva nos três solos escolhidos. Os graus de saturação apresentados nas tabelas são todos em relação a água. A relação entre a viscosidade do diesel na temperatura de ensaio e a viscosidade do diesel a 20°C, fator de correção para a obtenção do k20 (coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20°C), foi obtida a partir de

equações que foram ajustadas aos dados das curvas apresentadas por Pianovsk Jr. (2002).

Como análise, para compreender melhor esses resultados, foi construído o gráfico apresentado na Figura 11, com os valores médios dos resultados dos

ensaios para as amostras da Formação Barreiras, regolito e massapê, onde no eixo das abscissas estão os graus de saturação em relação ao óleo diesel e no eixo das ordenadas os valores médios de permeabilidade efetiva obtidos para esses meios.

**Tabela 4.** Média dos índices físicos das amostras de solo após a compactação.

Índices físicos	Umidade em relação à água ( $W$ ) (%)	Grau de saturação em relação à água ( $S_r$ ) (%)	Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) kN/m <sup>3</sup>	Peso específico total ( $\gamma_t$ ) kN/m <sup>3</sup>	Peso específico seco ( $\gamma_d$ ) kN/m <sup>3</sup>	Índice de vazios ( $e$ )
Formação Barreiras compactado com $S_r=20\%$	5,1	20	26,74	16,75	15,95	0,68
Regolito compactado com $S_r=10\%$	3,7	10	27,76	14,21	13,73	1,02
Massapê compactado com $S_r=40\%$	9,5	40	27,54	18,2	16,65	0,65
Massapê compactado com $S_r=40\%$ e deixado secar ao ar livre	5,7	26,5	27,54	18,33	17,34	0,59

**Tabela 5.** Resultados dos ensaios para a determinação da permeabilidade efetiva ao óleo diesel para as amostras da Formação Barreiras.

Amostras da formação Barreiras	Permeabilidade efetiva ao diesel (cm/s)			
	$S_r=20\%$	$S_r=40\%$	$S_r=60\%$	$S_r=80\%$
AM1	1,41E-004	1,68E-004	7,06E-005	2,78E-005
AM2	1,43E-004	1,19E-004	6,43E-005	3,45E-005
AM3	1,75E-004	1,26E-004	6,72E-005	3,39E-005
AM4	1,59E-004	2,80E-004	7,54E-005	3,12E-005
AM5	-----	-----	7,82E-005	-----
Média	1,55E-004	1,73E-004	7,11E-005	3,19E-005

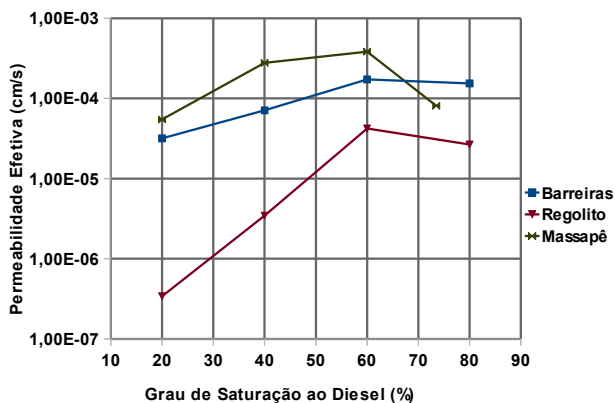
**Tabela 6.** Resultados dos ensaios para a determinação da permeabilidade efetiva ao óleo diesel para as amostras de regolito.

Amostras de regolito	Permeabilidade efetiva ao diesel (cm/s)			
	$S_r=20\%$	$S_r=40\%$	$S_r=60\%$	$S_r=80\%$
AM1	2,14E-005	1,39E-005	5,50E-006	4,55E-007
AM2	3,81E-005	7,03E-005	2,41E-006	3,58E-007
AM3	3,51E-005	2,18E-005	2,45E-006	2,10E-007
AM4	1,23E-005	6,31E-005	-----	-----
Média	2,67E-005	4,23E-005	3,45E-006	3,41E-007

**Tabela 7.** Resultados dos ensaios para a determinação da permeabilidade efetiva ao óleo diesel para as amostras de massapê.

Amostras de massapê	Permeabilidade efetiva ao diesel (cm/s)			
	$S_r=26,5\%$	$S_r=40\%$	$S_r=60\%$	$S_r=80\%$
AM1	1,21E-004	5,03E-004	1,31E-004	9,19E-005
AM2	6,60E-005	2,84E-004	3,99E-004	3,96E-005
AM3	5,71E-005	3,40E-004	3,05E-004	3,23E-005
AM4	-----	4,07E-004	-----	-----
Média	8,12E-005	3,83E-004	2,78E-004	5,46E-005





**Figura 11.** Valores médios de permeabilidade efetiva em função do grau de saturação do diesel

Conforme se pode observar no gráfico apresentado na figura 11, o grau de saturação relativo ao diesel representa uma importante influência nos valores experimentais de permeabilidade efetiva. Nos três tipos de solo, para um aumento no grau de saturação do diesel de 20% até 60%, os resultados obtidos foram de acordo com o esperado, com a permeabilidade efetiva aumentando com o teor do fluido (diesel) nos poros das amostras, no entanto, para os graus de saturação superiores a 60%, esta tendência não é observada. Uma possível explicação para estes resultados, para o caso das amostras secas ao ar livre (massapê), é a retração que esses corpos de prova sofreram no processo de secagem, provocando uma diminuição no volume de poros nas amostras, conforme pode ser observado na Tabela 4, inclusive o valor médio de permeabilidade efetiva para o solo massapê, considerando as amostras secas ao ar livre, teve uma diminuição mais acentuada em comparação com os outros dois tipos de solo com o grau de saturação em relação à água de 20%. Para os corpos de prova com graus de saturação em relação ao diesel menores do que 70%, a água ocupa os poros menores por questões relativas à molhabilidade e aos fenômenos de interação partícula sólida/fluido, ficando a permeabilidade efetiva ao diesel, que é o fluido não molhante, governada pelos poros maiores. Outro fator que pode ter colaborado para a diminuição do volume de poros dos corpos de prova com graus de saturação em relação ao diesel superiores a 70% é que o diesel, pela sua própria característica apolar, provoca retração nas amostras de solo, quando as mesmas são permeadas pelo combustível. Existe também a questão da perda de carga provocada pelo atrito entre o fluido e a partícula sólida, que acaba resultando em perda de pressão e consequentemente na diminuição da permeabilidade. Quando as amostras estão com um grau de saturação maior em relação à água, a água, pelo fato de ser o fluido molhante, molha preferencialmente a superfície das partículas sólidas do solo, então neste caso, o atrito que ocorre devido

ao escoamento do diesel é entre fluidos e é menor do que o atrito que ocorre no escoamento do diesel através de uma amostra de solo com pouca água, que passa a ser, em grande parte, entre fluido e partículas sólidas.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho trata da determinação experimental da permeabilidade efetiva de fluidos imiscíveis em sistemas bifásicos, especificamente diesel e água, utilizando permeâmetro de parede rígida. A técnica adotada foi baseada na metodologia de fluxo em regime permanente. As amostras de solo, após compactação, foram submetidas a valores distintos de grau de saturação pelo fluido molhante (20%, 40%, 60% e 80% de água), passando então a ser percoladas pelo fluido não molhante (óleo diesel) por tempo suficiente para obtenção de condições de fluxo estacionárias.

Os resultados experimentais mostraram que a existência de água nos vazios do solo diminui a permeabilidade deste aos fluidos menos molhantes por deixar uma menor quantidade de vazios disponível para a sua percolação, por outro lado, o grau de saturação relativo ao diesel representa também uma importante influência nos valores experimentais de permeabilidade efetiva. Nos três tipos de solo ensaiados, na maioria dos casos, os resultados obtidos mostraram um aumento da permeabilidade efetiva com o aumento do teor do fluido (diesel) nos poros das amostras.

Com essa metodologia experimental há a possibilidade de ampliar o estudo utilizando outros poluentes imiscíveis e outros tipos de solos, pois assim, com um maior número de dados experimentais, é possível prever o comportamento desses fluidos no solo e obter informações mais precisas sobre os fenômenos envolvidos no transporte de poluentes imiscíveis através do mesmo.

A metodologia experimental implementada apresenta como grande vantagem a sua simplicidade de execução e a não necessidade de se utilizar a técnica de translação de eixos ou medidas de sucção no experimento, por se tratar de fluxo da fase não molhante.

## 5 REFERÊNCIAS

- Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, INC.
- Brown, K. W., Anderson, D. C. (1983) Effects of organic solvents on the permeability of clay soils. Environmental Protection Agency (U.S.), EPA-600/S2-83-016.

- Brown, K. W., Thomas, J. C. (1984) Conductivity of Three Commercially Available Clays to Petroleum Products and Organics Solvents. *J. of Hazardous Wastes*. Volume 1, Number 4, 546-553.
- Delshad, M., Pope, G. A. (1989) Comparison of Three-Phase Oil Relative Permeability Models. *Transport in Porous Media*. Volume 4, 59-83.
- Demond, A. H. (1988) Capillarity in two-phase liquid flow of organic contaminants in groundwater. 210 p. Dissertation Stanford University, Department of Civil Engineering.
- Dicarlo, D. A., Sahni, A., Blunt, M. J. (2000) The Effect of Wettability on Three-Phase Relative Permeability. *Transport in Porous Media*. Volume 39, 347-366.
- Fernandez, F., Quigley, R. M. (1985) Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. *Canadian Geotechnical Journal*. Volume 22, 205-214.
- Fourie, A. B. & Papageorgian, G. A. (1995) technique for the rapid determination of the soil moisture retention relationship and hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Proc. of the 1st Int. Conf. on Unsaturated soils*. Paris.
- Machado, S. L., Dourado, K. A. (2001) Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. In: 4o Simpósio Brasileiro de solos não saturados, Porto Alegre. v.1, 325 – 336.
- Mendonça, A. L. (2003) Simulação Numérica de escoamentos Incompressíveis Bifásicos de Fluidos Não-Newtonianos e Imiscíveis em Meios Porosos Via Método dos Elementos Finitos. 147 f. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Dep. Engenharia Civil.
- Nutting, P. G. (1934) Physical Analysis of Oil Sands. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* v. 14 1337-1349.
- Oliveira, J. C. S. de. (2001) Contaminação de Sedimentos Argilosos por Combustíveis Automotivos: Problemas de Avaliação da Permeabilidade. 116 f. Tese de Doutorado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Parker, J. C. (1989) Multiphase Flow and Transport in Porous Media. *Reviews of Geophysics*. N° 27, v. 3, 311 – 328.
- Pianovsk Jr, G. (2002) Utilização de Misturas de Óleo Diesel e Ésteres Etílicos de Óleo de Soja como Combustíveis Alternativos: Análise do Desempenho e do Processo de Combustão no Motor Diesel. 132 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná.
- Schramm, M., Warrick, A. W., Fuller, W. H. (1986) Permeability of soils to four organic liquids and water. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, Volume 3, Number 1, 21-27.
- Van genuchten, M. T. (1980) A closed form equations for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*: 44, 892-898.