

Estudo da Permeabilidade Relativa ao Óleo Diesel em Solo Compactado da Formação Barreiras

Rita de Cassia Viana Cerqueira

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, cassiabass@hotmail.com

Miriam de Fátima Carvalho

Universidade Católica do Salvador, Salvador, Bahia, Brasil, mfcmachado@gmail.com

Sandro Lemos Machado

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, smachado@ufba.br

Osvan Passos Batista

Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, osvanpb@gmail.com

Jonathan dos Santos Batista

Universidade Católica do Salvador, Salvador, Bahia, Brasil, jonathanengcivil.ucsal@gmail.com

Riseuda Pereira de Sousa

Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil, riseuda.sousa@gmail.com

RESUMO: Neste artigo estuda-se a influência do conteúdo de água na permeabilidade relativa de um combustível derivado de petróleo em um sistema bifásico. O solo utilizado no estudo é um solo sedimentar areno argiloso que apresenta distribuição de poros bimodal e o fluido não miscível é o diesel comercial s10. Foram realizados ensaios de caracterização do solo e dos fluidos utilizados. A permeabilidade a carga variável foi mensurada utilizando-se permeâmetros de parede flexível e amostras de solo compactadas em torno de 30% de grau de saturação e depois secadas ou umedecidas, visando atingir o conteúdo de água desejado (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%), cada ponto em triplicata. Os resultados obtidos mostraram que a permeabilidade efetiva ao diesel é consideravelmente influenciada pelo teor de água no solo, e apresenta comportamento inversamente proporcional até o grau de saturação à água de 40%. Mostraram também que para saturações à água superiores que 40%, o fluxo de diesel expulsava água dos corpos de prova. Com os resultados obtidos foram elaboradas as curvas de permeabilidade relativa e efetiva ao diesel, estes foram analisados tendo como base os anteriores obtidos pelo mesmo grupo de pesquisa e na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Permeabilidade relativa, combustíveis derivados de petróleo, solos não saturados.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de fluxo de fluidos não miscíveis em meios porosos é de fundamental importância na área ambiental devido à recorrência de derramamentos de combustíveis em zona

petrolífera, em postos de combustíveis e em acidentes rodoviários, acarretando grandes impactos ambientais ao solo e aos corpos hídricos.

Os derivados de petróleo, devido à sua baixa polaridade nas ligações químicas são, de modo

geral, imiscíveis em água. Portanto, nos casos de derramamentos em solos, estes fluidos são subdivididos de acordo com a sua densidade, entre dois grupos: os DNAPLs (Líquidos não aquosos mais densos que água) e os LNAPLs (Líquidos não aquosos mais leves que água).

O comportamento destes fluidos em contato com o solo não saturado é semelhante. Porém, parâmetros como densidade, viscosidade e saturação dos fluidos, mineralogia e superfície específica dos grãos poderão interferir no fluxo no meio não saturado, a depender do solo em questão.

Dentre as características dos fluidos imiscíveis que percolam o meio poroso, a tensão interfacial dos fluidos imiscíveis, que pode ser definida como a diferença de energia de atração entre as moléculas de cada fluido, determinará a molhabilidade numa superfície sólida, tendência de um fluido a atrair-se à superfície (FETTER, 1992). Em geral, nos sistemas bifásicos em que os fluidos imiscíveis são NAPL e água, e a superfície sólida consiste de minerais inorgânicos, a água comporta-se como fluido molhante e cobre o sólido, e o NAPL comporta-se como o fluido não molhante e tende a escoar.

Estudos experimentais vêm sendo desenvolvidos, visando maior entendimento da interação dos fluidos imiscíveis em meios porosos não saturados. Oostrom (1998) desenvolveu um estudo comparativo de percolação de LNAPL em solo não saturado utilizando uma razão de 1:9 de 1-Iodoheptano e soltrol 220, em três colunas de areia não saturada, com diferentes porosidades. Cardoso (2011) utilizou óleo diesel como LNAPL para descrever a permeabilidade efetiva em função da saturação em colunas compactadas, em três tipos de solo com diferentes granulometrias.

A permeabilidade mostra-se então um parâmetro de fundamental importância no estudo de fluxo de fluidos imiscíveis no solo.

A descrição matemática do fluxo de um líquido em meio poroso saturado foi apresentada em 1985 por Henry Darcy, que investigou o fluxo unidimensional de água através de filtros de areia. A relação linear obtida por Darcy é apresentada na equação 1.

$$Q = \frac{K \times A \times dh}{dx} \quad (1)$$

Em que Q é a vazão ($L^3.T^{-1}$), A é a área da seção transversal do filtro (L^2) e (dh/dx) o gradiente hidráulico. O parâmetro k ($L.T^{-1}$) é coeficiente de permeabilidade.

Podem-se distinguir no meio científico três parâmetros: a permeabilidade intrínseca (L^2), a permeabilidade efetiva ($L.T^{-1}$) e a permeabilidade relativa (adimensional).

A permeabilidade intrínseca de um solo (L^2) representa a habilidade do meio poroso em permitir o escoamento de um único fluido através de seus poros. Em meios granulares, a permeabilidade intrínseca pode ser considerada uma propriedade exclusiva do meio poroso. Em meios porosos que apresentam minerais argilosos porém esta propriedade pode sofrer influência das características do fluido permeante. Isto ocorre porque existe um excesso de cargas elétricas na superfície dos minerais e em geral estes possuem uma sua grande superfície específica, que interage com os fluidos em especial com os fluidos polares (CARDOSO, 2011). Assim sendo, para solos com características intermediárias entre granular e argilosa, os fenômenos de interação dos fluidos com o solo podem possuir influência na permeabilidade intrínseca.

A relação de proporcionalidade entre a permeabilidade intrínseca, as propriedades do fluido e as características do meio poroso foi proposta por Nutting (1930) para a obtenção do coeficiente de permeabilidade de um fluido qualquer, em meios porosos não reativos, conforme a equação 2.

$$k = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (2)$$

Em que k ($L.T^{-1}$) é o coeficiente de permeabilidade, ρ ($M.L^{-3}$) é a massa específica do fluido, μ ($M.L^{-1}.T^{-1}$) é a viscosidade absoluta do fluido, g ($L.T^{-1}$) é a aceleração da gravidade e K é a permeabilidade intrínseca do meio (L^2).

Machado (2014) propôs a relação para a previsão da permeabilidade intrínseca de um determinado fluido a partir da permeabilidade da água com base na equação de Nutting (1930), porém levando em consideração as propriedades do solo (índice de plasticidade, saturação à água, dentre outras) e as propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade, etc.), conforme a equação 3. Esta equação mostra-se abrangente

também para meios reativos e que para meios não reativos retorna a equação de Nutting (1930).

$$K_r = \frac{\rho_f}{\mu} \cdot \frac{\mu_w}{\rho_w} \cdot K_w \cdot 10^{\left\{ a \cdot \left(\left(\frac{\epsilon_w}{\epsilon} \right) - 1 \right)^b \left[\frac{1 - \exp \left(\frac{-c \cdot PI}{C + PI} \cdot \log \frac{K_{ref}}{K_w} \right)}{\frac{PI}{C + PI} \cdot \left\{ d \cdot \log \frac{K_{ref}}{K_w} + \frac{e}{(1 + S_w)} \right\}} \right] \right\}} \quad (3)$$

Na qual, ρ_f (M.L⁻³) é a massa específica do fluido, ρ_w (M.L⁻³) é a massa específica da água, μ_f (M.L⁻¹. T⁻¹) é a viscosidade absoluta do fluido, μ_w é a viscosidade absoluta da água (M.L⁻¹. T⁻¹), K_w é a permeabilidade à água, a, b, c, d e são parâmetros de ajuste usando-se como base os valores a seguir: a = 0,263, b = 0,20, c = 5,00, d = 1,19, e = -0,259 e k_{ref} = 1,34 x 10⁻² cm/s (PI em %), s_{rw} é saturação de água, e ϵ é a constante dielétrica relativa.

A permeabilidade efetiva (k_{ef}) [L.T⁻¹] pode ser dita como a facilidade com que um fluido se move em um meio poroso, onde ocupa apenas parte dos vazios existentes, estando o resto ocupado por outros fluidos imiscíveis (CARVALHO, 2015). Este parâmetro, então, é de fundamental importância no estudo do fluxo multifásico. Nestes casos em que observa-se mais de um componente (fluido) nos poros do solo, cada fase dos componentes irá preencher determinado espaço nos poros deste, e a área da secção transversal do poro disponível para fluir cada componente será menor que a área total disponível. O fluxo de cada componente será influenciado pela presença dos demais fluidos, e é importante a análise da permeabilidade relativa, K_r (adimensional), que seria a razão entre a permeabilidade média efetiva para um fluido com determinada saturação, e a permeabilidade deste mesmo componente quando os poros estão saturados por este fluido (MONTORO, 2006).

$$K_r = \frac{K_i}{K_{sat}} \quad (4)$$

Em que K_r é a permeabilidade relativa, K_i (L.T⁻¹) é a permeabilidade com saturação do fluido abaixo de 100% e K_{sat} (L.T⁻¹) é a permeabilidade saturada deste fluido.

Diversos autores salientam a importância da distribuição granulométrica na análise da permeabilidade efetiva do solo. Soto (2013) salienta que os fatores que governam o movimento de fluidos no solo não saturados são

as curvas de retenção no solo e as curvas de condutividade hidráulica não saturada. Porém, grande parte dos estudos não leva em consideração as características multimodais de solos com diferentes distribuições granulométricas. Cardoso (2011) destaca que a distribuição granulométrica do solo, o grau de saturação, a esfericidade das partículas bem como a superfície molhada influenciam consideravelmente a permeabilidade efetiva do solo.

O objetivo deste trabalho, portanto, é analisar a influência da saturação de água na permeabilidade efetiva do diesel em um solo com característica bimodal, levando em consideração os parâmetros do solo e dos fluidos que interferem nesta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos Fluidos Utilizados

O fluido molhante utilizado foi a água distribuída pela Empresa Baiana de Saneamento – EMBASA. Como fluido não molhante, LNAPL, utilizou-se o diesel comercial S10, adquirido em grande quantidade no posto da Petrobrás BR no lote de Janeiro de 2015 e estocado em bombonas de 50L na planta piloto de Biodiesel, na Escola politécnica da UFBA.

As análises de caracterização dos fluidos foram realizadas triplicata e consistiram em: levantamento das curvas de viscosidade, de densidade, de tensão superficial e interfacial da água e do diesel em função da temperatura.

O levantamento da curva de tensão superficial e interfacial dos fluidos foi realizado através da leitura desses parâmetros em cinco temperaturas diferentes impostas num Banho (Modelo TC-550, Brookfield, USA), acoplado ao tensiômetro de bancada (Modelo Easy Dyne, Kruss). Antes de iniciar a leitura da tensão superficial ou interfacial, determinou-se a densidade de cada fluido em cada temperatura a ser analisada. As temperaturas dos fluidos eram checadas utilizando-se um Alicat Amperímetro (True-RMS Fluke 323, Fluke). Quando coincidentes com as do banho, iniciava-se a leitura dos parâmetros.

As curvas de viscosidade foram medidas por

um viscosímetro rotativo (Modelo DV2T, Brookfield, USA) acoplado ao Banho (Modelo TC-550, Brookfield, USA). Antes da realização do ensaio foi feita a configuração necessária do equipamento, julgando os dados de velocidade, temperatura e nível de inclinação da bancada. Foram pré-estabelecidas 5 temperaturas, e após a estabilização de cada uma entre o valor apresentado no visor do banho e o valor apresentado pelo sensor de temperatura do próprio viscosímetro, as leituras eram então iniciadas.

2.2 Caracterização do Solo

Os ensaios foram realizados utilizando o solo coletado no Aterro Metropolitano de Salvador, do tipo Barreiras.

O solo de formação barreiras foi escolhido devido as suas características geotécnicas de baixa porcentagem de finos e baixo índice de plasticidade, além de sua disponibilidade de coleta e grande representatividade no território brasileiro. O solo foi coletado no bota fora do Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador – ASMC e caracterizado geotecnicamente no Laboratório de Solos da Universidade Católica do Salvador por meio de ensaios de Análise Granulométrica - NBR 7181/1984, Massa Específica dos Sólidos, NBR 6508/1984, Limites de Atterberg, segundo as NBRs 6459/1984 e 7180/1984 e Ensaio de Compactação, NBR7182/1986.

A caracterização química foi realizada no laboratório de Solos do ITPS (Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe), de acordo o manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Embrapa. Sendo qualificados e quantificados quanto aos parâmetros de fertilidade do solo.

2.3 Determinação da curva de retenção a água

Corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram compactados na umidade gravimétrica de 5%, visando atingir uma massa específica seca de 1,82 g/cm³. Após a compactação, os corpos de prova foram fatiados em amostras de cerca de 2 cm de altura e usadas para obtenção da curva de retenção à água por processo de secagem pelos métodos de Papel

Filtro, câmara de pressão Machado e Dourado (2001) e Funil de Haines (Figura 1).

Nas amostras ensaiadas pelo método do papel filtro foram adicionados conteúdos de água variáveis de modo atingirem graus de saturação entre 10% a 90%, foram então isoladas juntamente com dois papéis de filtro, Whatman nº 42, em contato com o solo. Os conjuntos foram colocados em recipientes plásticos, vedados e acondicionados em uma sala climatizada dentro de um isopor. Após 60 dias, tempo de estabilização da sucção, as amostras foram retiradas e tiveram suas umidades determinadas juntamente com as umidades dos papéis superiores. A sucção de cada papel foi obtida a partir da umidade e a sucção de cada amostra de solo foi considerada a mesma do papel.

O método das câmaras de pressão adaptadas por Machado e Dourado (2001) foi utilizado visando a obtenção dos pontos de maiores valores de sucção. Um programa de aquisição de dados registra e apresenta os valores de pressão aplicada e de saída das câmaras, bem como o volume de água drenado de cada câmara. Amostras de 2cm de altura inseridas em anel metálico foram colocadas sobre um disco cerâmico de alta entrada de ar e submetidas à saturação por capilaridade, mediante preenchimento das câmaras com água até aproximadamente 80% da sua altura total. Após a visualização da saturação das amostras, as câmaras foram fechadas e uma pressão de ar de 600 kPa foi aplicada no topo da célula. Ocorreu então um equilíbrio entre o valor da pressão da linha de saída da câmara, o sistema foi aberto para a drenagem de uma determinada quantidade de fluido das amostras, após a drenagem o sistema foi então fechado até um novo estágio de equilíbrio ser atingido. Devido à perda gradual as alíquotas de água novos valores de sucção foram estabelecidos. Ao término do último estágio descomprimiram-se as câmaras, as amostras foram retiradas, pesadas e tiveram os teores de água remanescentes no último estágio de sucção determinados por secagem em estufa. Os volumes de água nas amostras, relativos a cada estágio de sucção, corresponderam à soma dos volumes do estágio posterior com volume drenado registrado no sistema. Calculando-se a partir daí as saturações das amostras referente a

cada estágio.

Para medir valores mais baixos de sucção foi usado o funil de Haines, construído em recipiente de aço inoxidável com placa porosa, conectado à uma mangueira (tubo em U) com a ponta aberta para atmosfera. A parte em que se encontra a amostra é constituída de uma placa porosa e uma base com ranhuras que mantêm a conexão do líquido. Gradientes hidráulicos são aplicados pelo abaixamento da ponteira e a umidade é obtida no final do ensaio, e corrigida pela massa perdida a cada pesagem antes da mudança do gradiente.



Figura 1. Ensaio de curva de retenção

O ajuste da curva de retenção a água foi realizado utilizando-se a equação duplo Van Genuchten (equação 5), proposto por Carducci *et al.* 2011. Este modelo apresenta uma adaptação do modelo de Van Genuchten 1980, para solos com característica bimodal estabelecendo assim nove parâmetros de ajuste.

$$U = U_{res} + \frac{U_{pmp} - U_{res}}{(1 + (\alpha_{tex} \cdot \psi_m)^{n_{tex}})^{m_{tex}}} + \frac{U_{sat} - U_{pmp}}{(1 + (\alpha_{est} \cdot \psi_{est})^{n_{est}})^{m_{est}}} \quad (5)$$

Em que U é a umidade gravimétrica (%), U_{res} um parâmetro de ajuste a umidade de saturação do solo (%), U_{pmp} corresponde a, α_{tex} e α_{est} são parâmetros de ajuste correspondentes às inclinações das curvas, n_{tex} , n_{est} e m_{tex} e m_{est} são correlacionados pela equação 6.

$$m_i = 1 - \frac{1}{n_i} \quad (6)$$

2.5 Determinação da Permeabilidade Efetiva

Os ensaios de permeabilidade efetiva foram realizados em corpos de prova compactados de forma similar aos já mencionados no item 2.4. Após compactados, os corpos de prova foram colocados em diferentes graus de saturação à água, alguns foram umedecidos adicionando-se diferentes conteúdos de água, outros foram

secados ao ambiente e pesados regularmente para checagem da massa de água especificada. Após atingirem a saturação desejada estes foram embalados em plástico filme e isolados em um ambiente hermeticamente fechado por 7 dias, até atingirem homogeneidade de umedificação.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados de acordo com a NBR 14545 - Determinação de Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável- que regula todos os procedimentos do ensaio.

Após decorridos os sete dias de estabilização, os corpos de prova eram desembalados e duas frações eram retiradas, uma do topo e uma da base para checagem da umidade em estufa à 100°C por 24, suas dimensões eram tomadas e o corpo de prova era instalado no permeâmetro de parede flexível. Procedia-se a saturação do corpo de prova com fluido de interesse (água ou diesel), e em condição de fluxo estacionário, os volumes percolados eram medidos em proveta de 100 mls (Figura 2), também media-se o tempo e temperatura, sendo que esta última permitirá a aplicação da correção para 20°C. Cabe ressaltar que os corpos de prova permeados com diesel, foram inicialmente envoltos por plástico PVC antes de receber a membrana de látex.

Durante os ensaios de permeabilidade ao diesel observou-se que, em corpos de prova mais úmidos (grau de saturação a água maior que 40%), a passagem do diesel retirava uma certa quantidade de água, e quanto maior o grau de saturação à água, maior era a quantidade de água expulsa. A quantidade de água expulsa foi medida e usada para correção do grau de saturação das amostras ensaiadas.

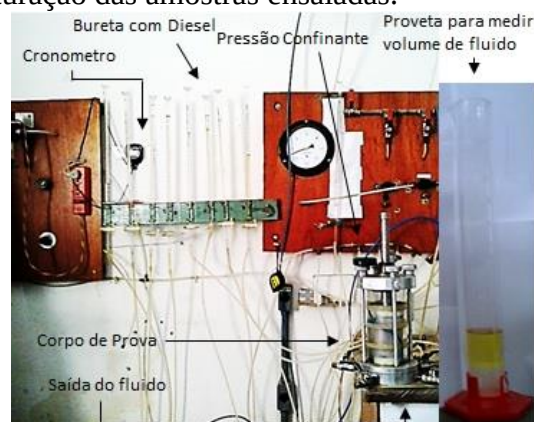


Figura 2. Ensaio de permeabilidade montado

3. RESULTADOS

As propriedades mensuradas para os fluidos usados, apresentadas na tabela 1, estão coerentes com os da literatura. O diesel S-10 possui densidade e tensão superficial menores que a água e viscosidades maiores. Além disso, observa-se um decréscimo dos valores das propriedades com o aumento da temperatura.

A tabela 02 apresenta as características geotécnicas do solo estudado. Trata-se de um

solo SM (classificação segundo a SUCS), com cerca de 19% de material fino (diâmetro menor que 0,075 mm) e finos não plástico.

A tabela 3 apresenta a caracterização química do solo com os principais elementos encontrados, apresentando uma baixa CTC (capacidade de troca catiônica) e baixa CTB. (Capacidade de troca de base).

Tabela 1. Propriedades dos fluidos

Temperatura (K)	Tensão superficial Diesel S10 (mN/m)	Tensão superficial Água S10 (mN/m)	Tensão Interfacial Diesel/Água (mN/m)	Massa específica Diesel S10 (kg/m ³)	Massa Específica Água (kg/m ³)	Viscosidade água (cP)	Viscosidade Diesel (cP)
288	27,08	70,35	10,60	832,00	1000,00	1,18	8,74
293	26,48	70,80	10,30	829,00	997,00	1,07	7,43
298	26,20	69,03	10,00	826,00	997,00	0,97	6,57
303	25,88	69,50	8,20	824,00	996,00	0,85	5,80
308	25,75	68,98	7,70	821,00	995,00	0,82	5,28
313	25,00	67,95	5,70	819,00	995,00	0,77	4,54

Tabela 2. Caracterização física do solo

										Massa				
Ensaio de Granulometria (%)							Ensaio de consistência			Esp. Grãos	Ensaio de compactação		Classificação das amostras	
Ped	AG	AM	AF	Silte	Arg.		LL	LP	IP	ρ (kg/m³)	Wótm (%)	ρdmáx (kg/m3)	SUCS	ABNT
														Areia
Média	0	11	42	29	6	13	NL	NP	NP	2660	11,50	182	SM	argilosa com pouco silte

Tabela 3. Caracterização química do solo

Parâmetro	Dimensão	Valor
Ph	-	6,03
Na (Sódio)	cmolc/dm ³	10,7
K (Potássio)	cmolc/dm ³	11
M.O.	cmolc/dm ³	2,82
SB Soma das bases trocáveis	cmolc/dm ³	1,63
CTC	cmolc/dm ³	2,12
Fe (Ferro)	cmolc/dm ³	39,2
Zn (Zinco)	cmolc/dm ³	7,95

A figura 3 apresenta o resultado da curva de retenção à água obtida pelas equações 5 e 6. A curva de retenção apresenta-se bimodal, com valor de sucção entrada de ar em cerca de 2KPa e umidade residual de cerca de 0,4%.

Os parâmetros de ajuste da curva apresentada na figura 3 são mostrados na tabela 4, bem como o valor do coeficiente de permeabilidade efetiva saturado à água experimental e calculado pela equação 1.

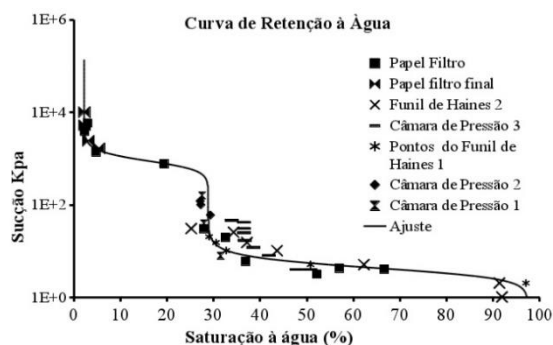


Figura 3- Curva de retenção à água

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da curva de retenção

Características médias dos c.p.s				Parâmetros de ajuste curva de retenção										
Peso específico dos grãos γ_s (KN/m ³)	Peso específico seco γ_d (KN/m ³)	Peso específico total γ (KN/m ³)		E	N	Upmp	Ures	Usat	α_{text}	Ntext	mtext	Aest	nest	Mest
1,23E-05	26,6	17,9	18,7	0,49	0,33	13	0,4	17,9	0,25	4	0,75	0,0012	4,5	0,78

A permeabilidade efetiva saturada ao diesel foi obtida experimentalmente conforme descrito em 2.5 e o resultado obtido foi comparado com a estimativa feita usando a equação de Nutting (eq. 2), os dados foram plotados na figura de Cardoso (2011), (Figura 4) para a checagem do desvio da equação de Nutting devido à interação dos finos com o solo.

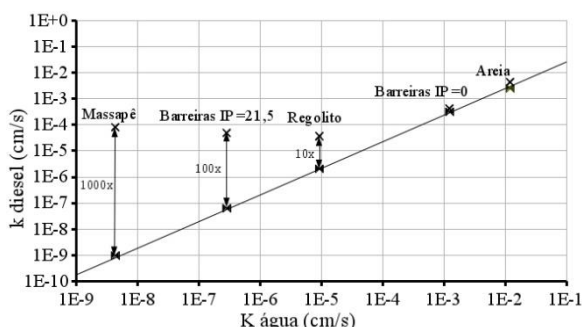


Figura 4-Desvio da equação de Nutting

Pode-se observar que apesar do solo estudado apresentar um teor de finos de 19% (ver tabela 02), ele apresentou um comportamento coerente com a equação de Nutting mostrando assim o prevalecimento do comportamento arenoso nas propriedades do solo, compatível com o seu comportamento não plástico e sua baixa capacidade catiônica 2,12 cmolc/dm³ em comparação com solo da formação Barreiras estudado por Cardoso (2011), caracterizado por Sousa (2012), que apresentou CTC de 3,7cmolc/dm³ e índice de plasticidade de 21%.

A permeabilidade efetiva ao diesel foi calculada pela equação 1 conforme descrita na, NBR 14545. Os resultados obtidos foram corrigidos em função da temperatura do ensaio conforme a norma específica. Observa-se acentuada diminuição da permeabilidade efetiva em função do aumento da saturação à água. Os dados obtidos estão apresentados na figura 5. Conforme nota-se na figura não foi possível a obtenção de dados de permeabilidade efetiva

para saturações à água superiores à 60%, devido à expulsão da água dos corpos de prova.

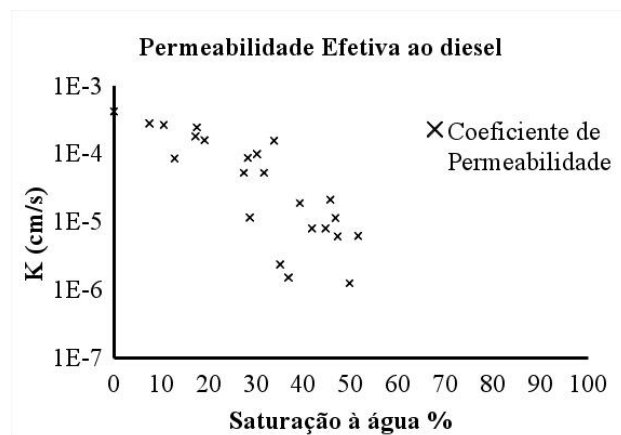


Figura 5- Permeabilidade efetiva ao diesel

O coeficiente de permeabilidade ao diesel com 0% de saturação à água foi de 5,33E⁻⁴ cm/s enquanto que o coeficiente de permeabilidade para o corpo de prova que inicialmente estava com 83% de água e ao final do ensaio estava com cerca de 35% de água foi de 2,3E⁻⁶cm/s, demonstrando assim a considerável redução da permeabilidade ao diesel em função do aumento do teor de água nos corpos de prova.

Utilizando-se a equação 4 foram encontrados os valores de permeabilidade relativa, estes resultados são apresentados em forma de gráfico, (figura 6) para melhor visualização do comportamento desta propriedade.

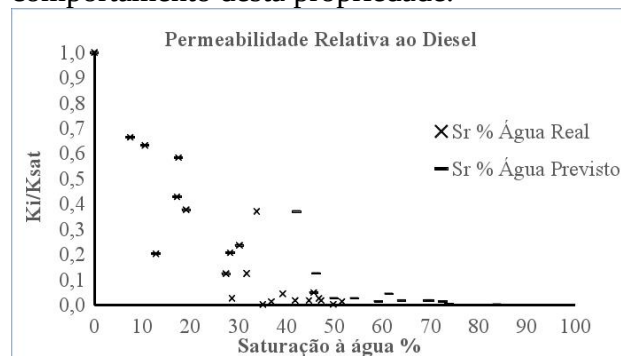


Figura 6- Permeabilidade relativa ao diesel

Na figura 6 nota-se que para valores de

saturação à água inferiores à 30% a saturação prevista de água (inicial) coincide com a saturação real (ao final do ensaio), não existindo assim expulsão de água dos corpos de prova. O fluxo de diesel apresenta-se contínuo nos macroporos do solo. Para valores de saturação à água superiores à 30%, os dados de permeabilidade relativa em função da saturação são deslocados para a esquerda para uma menor saturação, visto que devido à baixa pressão de entrada de diesel, retira-se água com fluxo de diesel. Este fato pode ser compreendido ao comparar-se a figura 3 com a figura 6. Nota-se que existe uma queda brusca da sucção à água acima de 30% de saturação, esta retenção tão baixa da água nos corpos de prova facilita a retirada de água, ocasionando uma saturação à água máxima inferior à 60% para este tipo de solo.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado objetivou a determinação da permeabilidade relativa ao diesel em solo da formação Barreiras, com característica arenosa e porosidade bimodal. A metodologia utilizada consistiu na utilização de permeâmetros de parede flexível e baixos gradientes hidráulicos, de acordo com a NBR 14454. Apesar disto notou-se que a pressão aplicada mostrou-se superior ao valor de sucção da curva de retenção da água para saturações superiores à 30%. Tanto a curva de permeabilidade efetiva quanto a permeabilidade relativa obtidas neste trabalho mostraram que com o aumento do teor de água nos poros do solo a permeabilidade ao diesel diminui. Pode-se concluir que para solos não plásticos e com baixas capacidades de trocas catiônicas e de bases, mesmo com a presença de minerais argilosos no solo, as características arenosas prevalecem, acarretando no fluxo de fluidos dependentes apenas das propriedades do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a Capes e a PETROBRAS pelas bolsas e pelo fomento à pesquisa e ao Laboratório de Geotécnia

Ambiental da UFBA pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

- Cardoso, L. P. (2011) *Estudo do transporte de poluentes imiscíveis em solos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia.
- Carducci, C. E.; Oliveira, G. C.; Severiano, E. C. e Zeviane, W. M. (2011) Modelagem da Curva de Retenção de Água de Latossolos Utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Vol. 35, n. 1, p. 77-86.
- Carvalho, Z. S. (2015) *Comportamento de Barreiras Minerais com Solo Compactado na Faixa Granulométrica Ótima para Contenção de Líquidos Orgânicos*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal da Bahia.
- Fetter, C. W. (1992) *Contaminat Hidrogeology*. New Jersey: Prentice Hall. Vol. 2, p. 209.
- Machado, S. L. (2014) Modeling Soil Permeability when Percolated by Different Fluids. Submetido para publicação.
- Machado, S. L. e Dourado, K. A. (2001) Novas Técnicas para Obtenção da Curva Característica de Sucção do Solo. *Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*. Porto Alegre, Vol. 1, p. 325-336.
- Montoro, M. A. e Francisca F. M. (2006) Transporte de Fluidos No Miscibles em Medios Porosos: Permeabilidad Relativa. *XVIII Congreso Nacional de Mecânica de Suelos e Ingeniería Geotécnica CAMSIG*, San Juan, Argentina.
- Oostrom, M. e Lenhard, R. J. (1998) Comparison of Relative Permeability-Saturation-Pressure Parametric Models for Infiltration and Redistribution of a Light Nonaqueous-Phase Liquid in Sandy Porous Media. *Advances in Water Resources*, Vol. 21, n. 2, p. 145-157.
- Sousa, R. P. (2012) *Estudo dos Fluxos de Óleo Diesel e Água em Solos não Saturados: Desenvolvimento experimental e Modelagem Matemática*. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial. Universidade Federal da Bahia.
- Soto, M. A. e Kiang, C. H. (2013) Permeabilidade Relativa em Zona Vadosa com Porosidade Bimodal: Um Estudo em Solos Brasileiros. *Águas Subterrâneas*, Vol. 27, n. 2, p. 93-103.