

PERCOLAÇÃO DE DIESEL E ÁGUA EM SOLO ARENO SILTOSO NÃO SATURADO: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Water and diesel percolation in unsaturated soil sand silt: an experimental approach

Rita de Cássia Viana Cerqueira^a, Miriam de Fátima Carvalho^b, Riseuda Pereira de Sousa^c, Sandro Lemos Machado^d, Iara Brandão de Oliveira^e

^a CEEP Irmã Dulce, Simões Filho, BA, Brasil

^b Universidade Católica do Salvador, Salvador, BA, Brasil

^c Depto. de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, BA, Brasil

^d Depto. de Ciências e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

^e Depto. Eng. Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

RESUMO – Ensaios de fluxo bidimensional de água e de diesel em solo SM, compactado com $w=5\%$ e $\rho_d=1,62 \text{ g.cm}^{-3}$ foram executados num canal de fluxo monitorado por tensiometria e análise visual. A migração dos fluidos aconteceu uniformemente na vertical e horizontal com espalhamento simétrico das frentes infiltrantes. A razão entre o tempo de chegada das frentes do diesel e da água à franja capilar (t_d/t_w) foi de 2,3, compatível com a razão ($\rho/\mu/\sigma$) que foi de 2,16. O comportamento das isócronas da água e do diesel foram explicadas pelo efeito conjunto da gravidade e do atrito na descida dos líquidos, representado pela mobilidade (ρ/μ), e o espalhamento lateral pelo efeito da capilaridade, comandada pela tensão superficial (σ). O uso de modelos unidimensionais para simular o avanço da frente bidimensional conduziu a um atraso no tempo de chegada da frente quando se aplica a equação de Brutsaert (1977), enquanto a equação de Philip (1969) proporcionou um elevado adiantamento. O modelo de Green Ampt (1911) conduz a resultados próximos do experimental, mas o de Philip (1969) corrigindo o espalhamento lateral, apresenta melhor aderência aos dados experimentais, com erro de cerca de 10% (retardo para o diesel e avanço para água).

ABSTRACT – This work developed two-dimensional flow experiments with water and diesel SM soil, using an instrumented flow channel monitored by tensiometer and visual analysis. The soil was compacted with $w=5\%$ and $\rho_d=1.62 \text{ g.cm}^{-3}$. The fluids migration occurred uniformly, both, in vertical and horizontal directions, with symmetrical spread of the infiltrating fronts. The ratio between the arrival time of the infiltrating fronts to the capillary fringe of diesel and water (t_d/t_w) was 2.3; compatible with the ratio (2.16) between the liquid properties ($\rho/\mu/\sigma$) for diesel and water. The behavior of the water and diesel isochrones were explained by the joint effect of gravity and friction on the liquids vertical flow, represented by the mobility (ρ/μ), and the lateral scattering by the capillarity effect, controlled by surface tension (σ). The use of one-dimensional models to simulate advance of the two-dimensional infiltrating front resulted in considerable delay using the Brutsaert equation (1977), while Philip (1969) provided a considerable advance. The simulations using the Green Ampt model (1911) were close to the experimental data. However, the Philip model (1969) with the correction for the lateral scattering, resulted in better simulations, error of about 10%.

Palavras Chave – Fluxo Bidimensional, Modelos de Infiltração, Solo não Saturado, LNAPL

Keywords – Bidimensional flow, Infiltration Models, Unsaturated Soil, LNAPL.

E-mails: cassiabass@hotmail.com (R. Cerqueira), mfcmachado@gmail.com (M. Carvalho), riseuda.sousa@uefs.br (R. Sousa), smachado@ufba.br (S. Machado), oliveira@ufba.br (I. Oliveira)

1 - INTRODUÇÃO

Estudos experimentais de migração de poluentes na zona não saturada do solo têm possibilitado a estimativa dos parâmetros de transporte, que são utilizados na prevenção e remediação de ambientes impactados. Nesta região, o fluxo é submetido a ações decorrentes das características de polaridade do fluido percolante e das forças capilares e de adsorção atuantes no meio, as quais são responsáveis pelo nível de interação entre fluido e meio percolante, e cujos efeitos, associados à distribuição e geometria dos poros, tornam o fluxo nesta região mais complexo que na zona saturada.

Eventos de alta interação entre solos finamente particulados ($d < 0,075$ mm), como os solos argilosos e fluidos percolantes polares, como a água, são visualizados na prática. As consequências desta forte atração eletrostática são as formações de espessas duplas camadas, não detectadas quando o fluido percolante é apolar, como os hidrocarbonetos. Devido a este fenômeno, um fluxo em meio poroso, em escala bidimensional, pode apresentar um elevado espalhamento horizontal ou se mostrar predominantemente vertical, o que possibilita a modelagem unidimensional do fluxo. Isto evidencia a ação do meio nos parâmetros de transporte de fluxo em solos não saturados, que usualmente são expressos através das relações k-P-S no formato das curvas de permeabilidade (relação P-k), de retenção de umidade (relação P-S) e da permeabilidade do fluido no meio saturado.

Estudos experimentais, de natureza unidimensional, empregando técnicas usuais de permeâmetros de paredes rígidas e paredes flexíveis, com cargas constantes e variáveis, para obtenção da permeabilidade saturada, revelam a interferência dos argilominerais nos valores da permeabilidade saturada. Oliveira (2001) e Cardoso *et al* (2011), percolando diferentes fluidos (água, álcool com gasolina, gasolina pura, tetracloreto de carbono, diesel e óleo combustível) em solos da região metropolitana de Salvador e do Recôncavo da Bahia (areia de duna e solos de natureza areno-argilosa de diferentes composições), constataram uma elevação no valor da permeabilidade com o decréscimo simultâneo do teor de argilominerais do solo e da constante dielétrica do fluido. Este mesmo fenômeno foi verificado por Fernandez e Quigley (1985), como mostra a Figura 1; Brown e Thomas (1984); Schramm *et al.* (1986); dentre outros. Ghildyal e Tripathi (1987) sugerem que ele tem relação com o nível de expansão das argilas e a consequente adsorção do líquido, que tende a se elevar com o aumento da constante dielétrica do fluido percolante, cujos valores, são da ordem de 80 para água e de 2 para os derivados de petróleo. Já Budhu *et al.* (1991), Hettiaratchi e Hruday (1987) sinalizam para a ação da polarização molecular responsável pela formação da camada dupla.

Na capacidade de retenção de umidade do solo, expressa através da relação P-S, a distribuição granulométrica tem papel preponderante. Nos solos mais grossos o controle é feito pela macroestrutura, enquanto que nos solos mais finos pela microestrutura, exigindo assim sucções mais altas diante da maior resistência à drenagem. Portanto, para uma pequena variação de sucção, os solos arenosos apresentam uma maior variação de umidade que os solos argilosos. O decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e a suavização da inclinação da curva de retenção.

Muitos métodos experimentais são relatados na literatura, para a determinação de curvas de retenção de líquidos, sendo que o seu uso está associado à faixa de sucção que se visa a atender, diante do formato da curva. Para o caso de sistemas bifásicos (água/ar), unidimensionais pode-se citar os trabalhos de Brooks e Corey (1964); Scheidegger (1974); Su e Brooks (1980); Lenhard e Parker (1988); Busby *et al.* (1995); Oostrom *et al.* (2003).

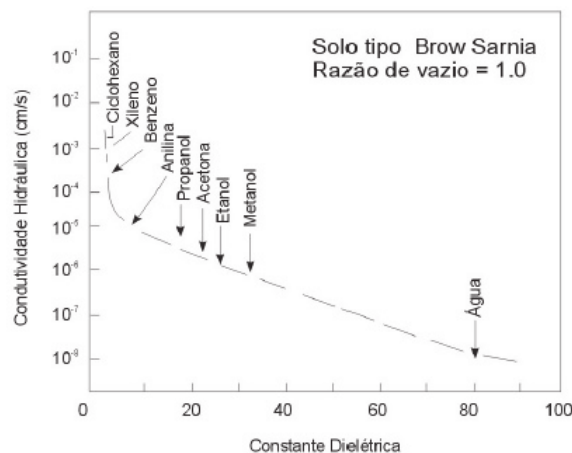


Fig. 1 – Variação da condutividade hidráulica com a constante dielétrica dos líquidos (Fenandez e Quigley, 1985).

As técnicas laboratoriais mais comuns empregadas para a determinação da curva de retenção são: placas de pressão (Machado e Dourado, 2001), translação de eixos, papel de filtro (Feuerharmel *et al.* 2004; Oliveira e Marinho, 2004; Mahler e Oliveira, 1998), funil de Haines (Libardi, 2005). Outras técnicas menos convencionais têm sido utilizadas como a teoria dos fractais (Bacchi *et al.* 1996; Soto *et al.* 2008); ensaios de tomografia computadorizada para imagens 3D (Delerue e Parrier, 2002); e a técnica de vaporização, uma combinação de tensiometria e métodos gravimétricos, utilizada por Oliveira (1995) e Sousa (2012) em solos arenosos, com obtenção de resultados similares aos da *Tempe Cell*. Nos ensaios de campo consta o uso de tensiômetros, para a quantificação da sucção, e de equipamento de TDR (*Time Domain Reflectometry*), com a técnica de reflectometria no domínio do tempo para determinar a saturação (Conciani *et al.* 1996).

Estes parâmetros hidráulicos, tão essenciais na previsão do fluxo bidimensional na zona não saturada do solo, são empregados na modelagem do avanço da frente de umedecimento na zona vadosa; utilizando modelos matemáticos pré-estabelecidos para infiltração.

Para infiltração unidimensional, modelos matemáticos como os de Green e Ampt (1911), Brutsaert (1977) e Philip (1969), apresentados no Quadro 1, são baseados na lei de Darcy e utilizam em geral parâmetros como déficit de umidade do solo ($\theta_s - \theta_i$), (%); sucção ($h_p - h_f$), (L); permeabilidade saturada k , (L.T⁻¹) e tempo decorrido desde o início da infiltração t , (T) para calcular a infiltração acumulada I , (L) na ocorrência de um derramamento (Jury *et al.*, 1991).

Diversos pesquisadores (Abriola e Pinder, 1985; Kaluarachi e Parker, 1989, Kueper *et al.*, 1989; Oostrom *et al.*, 2007; Kamaruddin *et al.*, 2011; dentre outros) têm realizado estudos relevantes nesta linha com trabalhos teóricos, na forma de modelos matemáticos e computacionais elaborados para descrever o fluxo de contaminantes em sub superfície. Também constam trabalhos experimentais, que envolvem estudos laboratoriais e de campo, com ensaios de infiltração de diferentes líquidos orgânicos em solos de diferente natureza, simulando o fluxo do contaminante.

Como estudos laboratoriais de fluxos bidimensionais têm-se experimentos realizados em areias compactadas que simulam derramamentos, pontuais ou distribuídos, de líquidos orgânicos imiscíveis em água, *NAPL - Non Aqueous Phase Liquid*, que podem ser leves (*LNAPL*) ou densos (*DNAPL*). O Quadro 2 apresenta um resumo de trabalhos, realizados com *LNAPL* em solos não saturados. Nele se constata: a tendência do uso de canal instrumentalizado, para simulação de fluxo bidimensional; o emprego de tensiômetros acoplados a parede do fundo, para o

acompanhamento da frente infiltrante; o uso da técnica de imagem, para registro da pluma infiltrante, e o acompanhamento do fluxo, através do avanço da pluma, visualizada na parede frontal do canal.

Quadro 1 - Modelos matemáticos para infiltração acumulada $I(t)$, fluxo unidimensional.

	Modelo	Parâmetros
Green e Ampt (1911)	$I(t) = kt + a \ln \left(1 + \frac{I(t)}{a} \right)$ (1)	$a = (\theta_1 - \theta_0)(h_p - h_f)$
Philip (1957)	$I(t) = S_p t^{\frac{1}{2}} + (A_2 + k)t + A_3 t^{\frac{3}{2}} + A_4 t^2$ (2) $S_p^2 = 2k(\theta_1 - \theta_0)(h_p - h_f)$	$A_n = \int_{\theta_0}^{\theta_1} f_n(\theta) d\theta$ Válida para tempos moderados
Philip (1969)	$I(t) = S_p t^{\frac{1}{2}} + At$ (3)	$A=0,38k$ (todos os tempos) $A=1$ (perfil saturado e tempo moderado) Válida para $t \leq t_{grav} = \frac{S_p^2}{(k_1 - k_0)^2}$ A t_{grav} as forças capilares e gravitacionais são comparáveis
Brutsaert (1977)	$I(t) = kt + \frac{S_p^2}{\beta k} \left[1 - \left[1 + \frac{\beta k t^{\frac{1}{2}}}{S_p} \right]^{-1} \right]$ (4)	$\beta=1/3$ (distribuição de poros uniformes) $\beta=2/3$ (solos de campo) $\beta=1$ (distribuição de poros largos)

Utilizando dados experimentais de fluxo em canal, Oliveira (1995) discute e testa a habilidade de modelos unidimensionais (Quadro 1) de simular a infiltração de água e de líquidos orgânicos (n-hexanol, etileno glicol, 4-cloro tolueno, óleo diesel) em areia. Seguindo a mesma linha, Sousa (2012) e Sousa *et al* (2019) mostra a possibilidade de simulação de fluxo bidimensional de água e de diesel em solo não saturado, utilizando o modelo unidimensional de Philip (1957, 1969) e o coeficiente de permeabilidade não saturado. Para adequar a equação de Philip (1969), aos efeitos do espalhamento lateral da frente infiltrante, foi utilizada a equação seguinte, que corrige a porosidade do solo, levando em consideração a relação entre a largura da pluma (L_p) pela largura da caixa de infiltração (L_R):

$$(\theta_s - \theta_i) = \Delta \theta \frac{L_p}{L_R} \Delta \theta_{\text{corrigido}} \quad (5)$$

onde L_p (L) representa a largura da pluma, L_R (L) a largura da caixa de infiltração e $(\theta_s - \theta_i)$ o déficit de umidade volumétrica, considerada como porosidade.

Diante da importância deste tipo de estudo, em prol da preservação dos recursos naturais, este trabalho visa, seguindo a mesma linha dos pesquisadores acima citados, a contribuir no estudo comparativo experimental dos fluxos bidimensionais de diesel e de água em um solo areno siltoso da Formação Barreiras, compactado e não saturado, além de avaliar a viabilidade dos modelos unidimensionais mais conhecidos para descrever o comportamento ensaiado.

Quadro 2 - Experimentos de Fluxo de *LNAPL*, modificado de Oostrom *et al.* 2007.

Referência	Material canal dimensões (cm) (L × H × W)	Tipo de solo	NAPL	Técnica de disposição do fluido	Técnica de medida da frente
Schwille, 1967	Vidro 105 × 105 × 15	Areia	Óleo Combustível	Carga variável 3 litros de óleo	F
van Geel e Sykes, 1994	Vidro e alumínio 150 x 120 x 6	Areia média com saturação variada	n-heptano	Carga constante no centro do canal, 2 cm	I, P
Catalan e Dullien, 1995	Vidro e aço inox 69 × 120 × 1,27	Areia d50=0,22mm	Soltrol 110	Carga distribuída variável	F
Oliveira, 1995	Vidro e aço inox 15 × 15 × 68,6	Areia seca	n-hexanol, etileno glicol, 4- cloro tolueno	Carga constante	RG
Chevalier <i>et al.</i> , 1998	Vidro, polimetacrilato de metila e aço. 100 × 100 × 5	Areia média e grossa (40 mesh)= (<0,42mm)	Gasolina	Taxa constante 30ml/min	F
McDowell e Powers, 2003	Vidro e aço inox 112 × 68 × 3	Quartzo (d50=0,035mm)	Gasolina	Taxa constante 35 ml/min	F, I
Wipfler <i>et al.</i> , 2004	Polimetacrilato de metila 40 × 40 × 2.5	Areia fina 0,7- 1,2mm e Areia grossa 1,0- 1,8mm	Combustível de aviação A-1 tingido com Sudão IV	Taxa de infiltração constante 1,875ml/min	F
Kechavarzi <i>et al.</i> , 2005	Vidro e polimetacrilato de metila 180 × 120 × 8	Areia fina e uniforme d50=0,14mm	Soltrol 220	Carga constante no centro do tanque 1,8 kPa	I, P
Oostrom <i>et al.</i> , 2006	Vidro 102 × 75 × 5.5	Areia Siltosa (40/50)	Óleo de Banha	-	F, I
Sousa, 2012	Vidro e aço inox 200 x 120 x 15	Areia média fina seca d50 aprox. 0,27mm	Óleo Diesel	Carga variável no centro do canal	I, P
Kererat <i>et al.</i> , 2013	87,6 x 37 x 35,5	Áreia fina (d50=0,15mm)	Parafina Líquida	Carga constante no centro do canal	I, P

L: Comprimento; H: Altura; W: Largura; F: Acompanhamento de fluxo; I: Registro de imagens; P: Transdutores de Pressão; RG: Escaneamento com raio gama.

2 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

2.1 - Caracterização dos líquidos

Os líquidos utilizados na pesquisa foram água da rede de abastecimento municipal e óleo diesel S10, adquirido em posto de combustível BR da cidade de Salvador, Ba, Brasil.

As propriedades destes fluidos (pressão de vapor, massa específica, viscosidade, tensão superficial e tensão interfacial) foram mensuradas, em triplicatas, a diferentes temperaturas (T). Os dados obtidos foram ajustados empregando-se o modelo exponencial ($y=Ae^{BT}$), para o caso da viscosidade e pressão de vapor, e o modelo polinomial de grau dois ($y=AT^2+BT+C$), para as demais propriedades. Os parâmetros decorrentes dos ajustes são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades dos fluidos utilizados.

Fluído	Propriedades	Parâmetro da equação de ajuste				Propriedade calculada à 20°C
		A	B	C	R ²	
Água	Massa específica (g.cm ⁻³)	7,85714	-0,0049	1,76054	0,92	0,829
	Tensão Superficial (mN.m ⁻¹)	-0,00169	0,9224	-54,4395	0,79	71,175
	Viscosidade (cP)	179,96	-0,0175	-	0,97	1,07
	Pressão de Vapor (kPa)	1,68x10 ⁻¹⁸	0,13664	-	0,82	1,70*
Diesel	Massa específica (g.cm ⁻³)	3,57x10 ⁻⁶	-0,0027	1,30367	0,99	0,997
	Tensão Superficial (mN.m ⁻¹)	-0,00011	-0,0092	38,5035	0,96	26,48
	Viscosidade (cP)	12444,74	-0,02528	-	0,99	7,43
	Pressão de Vapor (kPa)	2,44x10 ⁻¹³	0,0984	-	0,86	2,20*
Água-Diesel	Tensão interfacial (mN.m ⁻¹)	-0,00664	3,7975	532,062	0,97	10,30

*30°C

As viscosidades foram medidas por um viscosímetro rotativo (Modelo DV2T, Brookfield, USA) acoplado a um Banho Térmico (Modelo TC-550, Brookfield, USA). As leituras de pressão de vapor foram realizadas através de um analisador de vapor (Modelo ASTM D323, LACTEA Científica, Brasil), enquanto os dados de tensão superficial e interfacial foram medidos por tensiômetro com anel Du Nouy (Modelo Easy Dyne, Kruss, Alemanha).

Os resultados de tensão superficial, de viscosidade e de massa específica, obtidos tanto para água como para o diesel, e os da tensão interfacial água-diesel mostram uma tendência de decréscimo com o aumento da temperatura, comportamento similar aos de Vargafikt *et. al*, (1983). Por outro lado, os dados de pressão de vapor mostram crescimento com o aumento da temperatura, comportamento esperado diante do aumento da agitação molecular, conforme relatado por Perry e Chilton (1973) para água destilada.

2.2 - Caracterização do solo

Para realização dos ensaios de fluxo foi utilizado solo sedimentar da Formação Barreiras, no estado deformado, oriundo da área do bota fora do Aterro Sanitário Metropolitano Centro - ASMC, em Salvador-Ba, Brasil.

Quatro amostras de 20 kg do solo coletado foram submetidas à ensaios de caracterização geotécnica e de compactação, seguindo a padronização da ABNT (NBR 6457-1986, NBR 6508-

1984, NBR 7181-1984, NBR 6459-1984, NBR 7180-1984 e NBR 7182-1986). O Quadro 4 apresenta a média dos resultados obtidos.

Quadro 4 – Caracterização geotécnica do solo.

Parâmetro	Ensaio de Granulometria			Massa específica dos grãos (g.cm ⁻³)	Compactação: EPN		IP (%)
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		W _{ót} (%)	ρ _{dmáx} (g.cm ⁻³)	
X	82	6	12	2,657	11,50	1,818	NP
σ	1,12	0	1,12	0,004	0,13	0,024	
CV	0,01	0	0,09	0,158	1,14	1,333	

X: Média; σ: Desvio padrão; CV: Coeficiente de Variação; EPN: Energia do Proctor Normal; IP: Índice de Plasticidade.

O solo estudado foi classificado, de acordo com a USCS (*Unified Soil Classification System*), como SM (areia siltosa), por apresentar cerca de 80% de areia, 20% de finos (silte e argila) e ausência de plasticidade (NP). Essa formação apresenta solos com composição que varia de materiais não plásticos até plásticos de média atividade.

A caracterização mineralógica do solo foi realizada em um difratômetro de raio-X, (D2 Phaser, Bruker, USA) com tubo de cobre ($\lambda=1,5418\text{\AA}$), velocidade de 2°/min, rotação de 15°/min, potência de 30KV e corrente de 10mA. Amostras de solo trituras, passadas na peneira #200 e secas à 100°C, foram compactadas no amostrador do equipamento e submetidas a análise. O difratograma obtido foi analisado, com base nos elementos presentes em maior concentração, usando banco de dados *Crystallography Open Database* do *software* DifracEVA da Bruker. Os picos de difração mostram a presença de quartzo, muscovita e caulinita (argilo-mineral bilaminar de baixa plasticidade) indicando ser o solo inativo. A análise mineralógica também mostrou a presença de 50,6% de material no estado cristalino e 49,4% no estado amorfo.

O Quadro 5 apresenta resultados da composição química do solo estudado. O baixo teor de matéria orgânica (MO), 1,44%, com coeficiente de variação de 19%, foi obtido por calcinação, ensaiando nove amostras com cerca de 40 gramas, em forno mufla a 600°C por duas horas, após secagem em estufa a 70°C.

Quadro 5 - Caracterização química do solo

Metodologia	Parâmetro/Dimensão	Valor	Parâmetro/Dimensão	Valor
FRX	Si (ppm)	196320	Ti (ppm)	4758
	Al (ppm)	71249	Cl (ppm)	9302
	Mg (ppm)	25591	Ca (ppm)	937
	Fe (ppm)	8417	Zr (ppm)	207
Mehlich 1	pH	6,03	CTC (cmolc.dm ⁻³)	2,12
	Na (mg.dm ⁻³)	10,7	V(%)	76,90
	K (mg.dm ⁻³)	11,0	SB (cmolc.dm ⁻³)	1,63
Gravimetria	MO	1,44	PST (%)	2,22

V: Índice de saturação de bases; SB: Soma de Bases trocáveis; CTC: Capacidade de troca catiônica; PST: Percentual de sódio trocável; MO: Matéria Orgânica.

O ensaio de FRX foi realizado em amostras, com cerca de 30 gramas, secas à 100°C por 24 horas, em analisador de Fluorescência de Raio X portátil (X-MET 7500, Oxford Instruments,

USA), pelo método de análise Soil LE FP, por 15 segundos. Os resultados mostram a presença dos elementos silício, alumínio, magnésio em maior teor, em concordância com os resultados de DRX que indicam a presença de quartzo, muscovita e caulinita. A capacidade de troca catiônica (CTC) obtida foi de 2,12 cmolc.dm⁻³, valor situado na faixa de 1 a 5 cmolc.dm⁻³ e característico de solos com elevado percentual de areia e baixa capacidade de retenção de umidade, conforme reportado em Sousa (2012). O pH obtido foi de 6,0, indicativo de solo levemente ácido e coerente com o valor de 1,63 cmolc.dm⁻³ encontrado para SB.

2.3 - Propriedades Hidráulicas do solo

2.3.1 - Curvas de Retenção

As curvas de retenção de água e de diesel foram obtidas usando amostras de 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro talhadas do solo compactado na condição de umidade gravimétrica de 5% e massa específica seca de 1,818 g.cm⁻³ (ver Quadro 4), aceitando corpos de prova com grau de compactação, GC > 96% e desvio de umidade de $\pm 0,5\%$.

A curva de retenção de água foi obtida empregando-se as técnicas de papel filtro, funil de Haines e câmara de pressão, enquanto a do diesel foi obtida utilizando as duas últimas técnicas, pelo fato de o papel filtro não possuir curva de calibração para o diesel.

O método do papel filtro com contato foi utilizado na determinação da sucção mátrica da água. As amostras foram umedecidas com conteúdo de água variável de modo a atingirem graus de saturação entre 10 e 90%. Cada amostra foi colocada em contato com papel de filtro *Whatman* n° 42 e colocada em recipiente plástico vedado, acondicionado em caixa de isopor, em sala climatizada. Após o tempo de estabilização (cerca de um mês), as umidades da amostra e do papel foram determinadas e usando as equações de Chandler calculou-se a sucção do papel, que é considerada a mesma do solo:

$$\psi = 10^{(6,05 - 2,48 \log \omega_p)} \quad (6)$$

$$\psi = 10^{(4,84 - 0,0622 \omega_p)} \quad (7)$$

sendo: ψ a sucção (kPa) e ω_p a umidade gravimétrica do papel (%).

A equação 6 é utilizada para umidades maiores que 47% e a equação 7 para umidades menores. De posse dos resultados de umidade de cada amostra e do valor de sucção foi efetuada a montagem da curva de retenção de água na faixa de sucção de 1 a 10.000 kPa.

O método da câmara de pressão utilizado foi o adaptado por Machado e Dourado (2001), que consiste num sistema de câmaras e medidores de pressão e de volume ligados a um programa de aquisição de dados, que monitora os valores de pressão de ar na entrada e de água na saída da câmara, e o volume do fluido drenado. Para realização do ensaio, a amostra, acondicionada em anel metálico, foi colocada sobre o disco cerâmico da câmara e saturada com o fluido de interesse (água ou diesel). Após fechamento da câmara, e aplicação de uma pressão de ar de 600kPa esperou-se a estabilização da pressão no líquido (inicialmente igual a pressão de ar) e fez-se a retirada de uma alíquota do mesmo. Repetindo este procedimento, várias alíquotas foram coletadas após sucessivos estágios de equilíbrio da pressão do líquido na base da câmara, que possibilitaram a obtenção de diferentes valores de sucção. Ao término do ensaio, visando à determinação do teor remanescente de líquido, a câmara foi descomprimida e a amostra do solo foi retirada, pesada e submetida a secagem. No caso do ensaio realizado com água, a amostra foi seca em estufa à 100°C por 24 horas, enquanto que para o solo com diesel a amostra foi calcinada em forno mufla à 600°C, por duas horas. Devido a perda da matéria orgânica do solo, que ocorre durante a calcinação, os valores encontrados para o diesel foram corrigidos utilizando o conteúdo de material volátil

presente em amostras de solo secas a 60°C. De posse destes resultados efetuou-se a montagem da curva de retenção de cada fluido no intervalo de 1 a 200 kPa. Os valores de umidade dos estágios anteriores foram calculados utilizando a umidade final e os valores das alíquotas de líquido retiradas em cada estágio.

As medidas de sucção dos pontos iniciais da curva de retenção de água e de diesel foram realizadas utilizando-se funil de Haines. Para coleta dos dados, as amostras saturadas eram submetidas a diferentes valores de sucção, a partir da variação do desnível da saída de líquido em relação ao nível da pedra porosa, cujo valor máximo admitido foi o de 300 cm, que corresponde a sucção 30 kPa, aplicada ao final do ensaio. A cada nova altura, após total drenagem, a amostra era pesada para determinação do teor de líquido retirado. Após o último estágio de drenagem a amostra foi retirada, pesada e submetida a secagem, seguindo o procedimento descrito anteriormente, para determinação da umidade final.

As Figuras 2a e 2b apresentam as curvas de retenção de água e de diesel ajustadas com o uso da equação seguinte, proposta por Carducci *et al* (2011), um modelo bimodal desenvolvido a partir do modelo de van Genuchten (1980):

$$w = w_{res} + \frac{w_{pmp} - w_{res}}{\left(1 + (\alpha_{tex} \psi)^{n_{tex}}\right)^{m_{tex}}} + \frac{w_{sat} - w_{pmp}}{\left(1 + (\alpha_{est} \psi)^{n_{est}}\right)^{m_{est}}} \quad (8)$$

onde: w é a umidade gravimétrica (%), w_{res} é a umidade gravimétrica residual (%), w_{sat} é a umidade gravimétrica de saturação (%), w_{pmp} corresponde a umidade no ponto de murcha, α_{tex} e α_{est} são os parâmetros de ajuste correspondentes às inclinações das curvas nos dois trechos, n_{est} e m_{tex} são correlacionados como $m = 1 - 1/n$, para ambos os segmentos de curva.

A predominância da característica arenosa do solo no transporte de fluidos pode ser notada no acentuado decréscimo de umidade apresentado pelas curvas obtidas após o valor de entrada de ar. Ambas as curvas apresentaram formato bimodal, característico de solos com distribuição irregular de poros (o patamar horizontal da curva de retenção é indicativo da ausência de poros para aquele intervalo de sucção). As curvas de retenção tanto para a água como para o diesel mostraram baixa capacidade de retenção. Para a água, a pressão de entrada de ar é de cerca de 2 kPa para a primeira faixa de poros (macroporos) e 700 kPa para a segunda faixa de poros (microporos), já para o diesel é de cerca de 1kPa para a faixa dos macros e a faixa exata de entrada de ar dos microporos não pôde ser determinada, devido às limitações dos métodos empregados (impossibilidade de uso do papel filtro). Nota-se um bom ajuste da equação 8 com os dados experimentais sendo os coeficientes determinação em torno de 0,9, como mostra o Quadro 6.

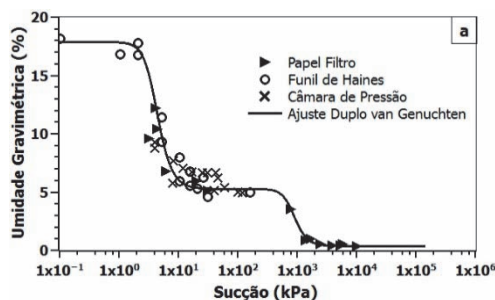


Fig. 2a - Curva de retenção de água;

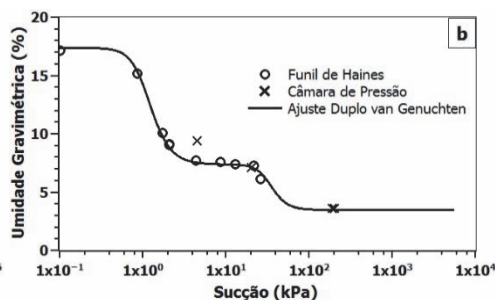


Fig. 2b - Curva de retenção de diesel.

Quadro 6 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção à água e ao diesel.

Fluidos	α_{tex} kPa ⁻¹	n_{tex}	m_{tex}	α_{tex} kPa ⁻¹	n_{est}	m_{est}	w_{res} (%)	w_{pmp} (%)	w_{sat} (%)	R ²
Água	0,25	4,0	0,75	0,0012	4,50	0,78	0,40	13,0	17,90	0,898
Diesel	0,90	4,0	0,75	0,0300	5,00	0,80	3,50	13,5	17,40	0,959

2.3.2 – Ensaio de Permeabilidade

Corpos de prova com aproximadamente 10 cm de diâmetro e 12 cm de altura foram compactados nas condições de umidade de 5% e massa específica seca de 1,62 g.cm⁻³ (valor estabelecido a partir da compactação no canal), em permeâmetros de parede rígida, ranhurados e ensaiados pelo método de carga variável (ABNT NBR 14545-2000). As amostras foram, inicialmente, submetidas a percolação de cerca de 300 cm³ de líquido (água ou diesel), calculado a partir do volume de poros do solo e observando a constância do fluxo na saída do corpo de prova e, em seguida, fez-se as leituras de volume percolado, tempo, temperatura e carga hidráulica. Empregando a lei de Darcy, os coeficientes de permeabilidade foram calculados e corrigidos para a temperatura de 20°C, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Permeabilidade à água e ao diesel – Ensaios realizados nas condições do canal.

Fluido	Dados dos corpos de prova				Coeficiente de permeabilidade		
	ρ_d (g.cm ⁻³)	e	w (%)	k à 20°C (cm.s ⁻¹)	Média (cm.s ⁻¹)	Desvio padrão (cm.s ⁻¹)	Coeficiente de variação (%)
Água	1,619	0,641	5,02	3,51x10 ⁻³	2,89x10 ⁻³	5,49x10 ⁻⁴	19,04
	1,617	0,643	5,03	2,79x10 ⁻³			
	1,617	0,643	5,04	2,19x10 ⁻³			
	1,619	0,641	5,04	3,05x10 ⁻³			
Diesel	1,619	0,641	5,04	1,65x10 ⁻³	1,78x10 ⁻³	2,01x10 ⁻⁴	11,32
	1,618	0,642	5,04	1,80x10 ⁻³			
	1,619	0,641	5,04	1,61x10 ⁻³			
	1,618	0,642	5,04	2,05x10 ⁻³			

Obteve-se um coeficiente de permeabilidade médio à água de 2,89x10⁻³cm.s⁻¹, com coeficiente de variação (CV) de 19% e para o diesel obteve-se permeabilidade efetiva de 1,78x10⁻³cm.s⁻¹, com CV de 11%. A permeabilidade à água foi 1,6 vezes superior à permeabilidade ao diesel. Esta diferença pode ser atribuída a maior viscosidade do diesel bem como a possível existência de filmes de água na superfície das partículas (amostras moldadas com 5% de umidade), interferindo na maior ou menor facilidade com o que o diesel percola pelo solo.

2.4 - Preparação e calibração da instrumentação

Para realização dos experimentos de infiltração foi usado um canal de fluxo instrumentalizado, tensiômetros hidrofóbicos e hidrofílicos e um sistema de aplicação de fluido. Adotando o procedimento de Sousa (2012), o processo de calibração dos tensiômetros (visto na Figura 3) consistiu na saturação das capas com pontas porosas em câmara de vácuo através do gotejamento de água deaerada ou diesel até a total extinção das bolhas de ar no sistema, de forma a minimizar o risco de cavitação dos tensiômetros durante as leituras.



Fig. 3a - Ponta porosa encaixada no corpo do tensiômetro; **3b** – Câmara de pressão com os tensiômetros; **3c** -Calibração dos tensiômetros (Sousa, 2012).

Os tensiômetros foram montados unindo-se, lentamente, as capas de ponta porosa aos transdutores de pressão (Figura 3a). Em seguida, utilizando-se uma coluna do fluido escolhido realizou-se a calibração dos tensiômetros, através da aplicação de sucessivos valores de sucção e pressão (Figura 3c). O tempo de resposta dos tensiômetros, encaixados em câmara de pressão (Figura 3b), foram avaliados conjuntamente, através da aplicação de pressão e de sucção seguido de registro no sistema de aquisição de dados HISCADA.

Para realização dos ensaios de infiltração no canal instrumentalizado foi utilizado um sistema de alimentação de líquido constituído de reservatório de Mariotte, caixa de infiltração e recipiente de suprimento do reservatório. O reservatório de Mariotte, feito em PVC, tem 30 cm de diâmetro e 40 cm de altura, e apresenta base e topo em aço inox, com conexões para entrada e saída de líquido, e regulador da carga hidráulica na caixa de infiltração, que para o experimento foi de 2 cm. A caixa de infiltração feita em aço inox, com dimensões de 20 x 14,4 x 8 cm, apresenta base biselada para permitir cravação no solo compactado e uma mangueira que faz a transferência do fluido do reservatório de Mariotte (Figura 4).

O canal de fluxo usado possui dimensões de 200 cm x 120 cm x 15 cm (comprimento, altura e largura, respectivamente). A parte frontal e as laterais do canal possuem paredes em vidro temperado (espessura de 10 mm), reforços metálicos e escala de medição. A parte traseira é em aço inoxidável com aberturas para acoplamento de tensiômetros e retirada de amostras de solo (Figura 5). As paredes internas foram revestidas com uma camada de areia fina fixada às paredes do canal com o uso de resina epóxi de forma a promover molhabilidade semelhante à do solo com os fluidos empregados e evitar o aparecimento de fluxo preferencial. Nas laterais do canal foram instalados permeâmetros Guelph, usados no final do ensaio para simular o lençol freático constante.

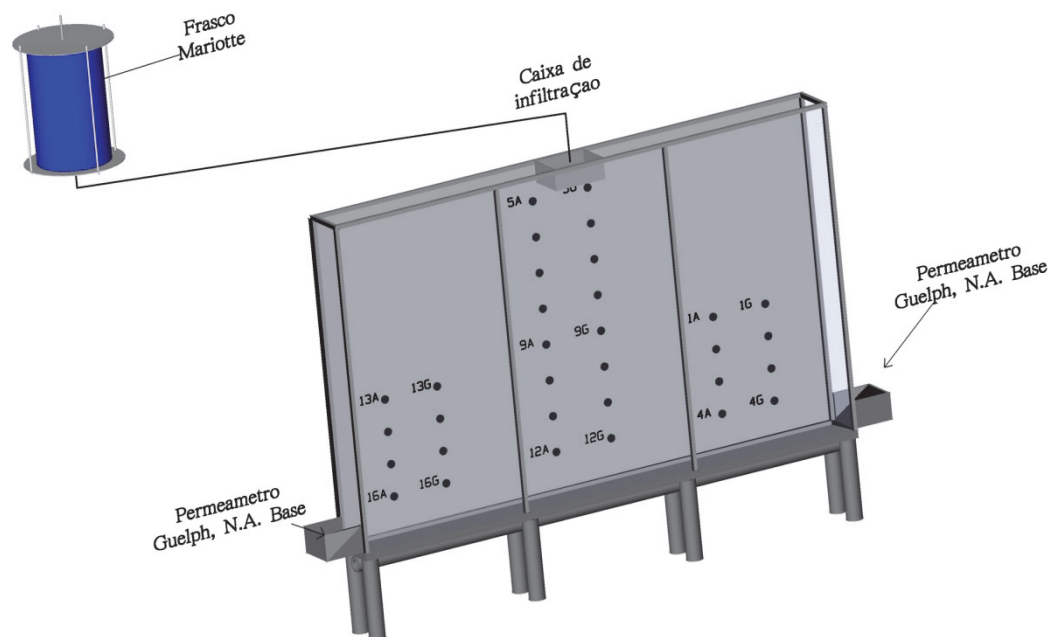


Fig. 4 - Esquema de realização do ensaio de infiltração.

2.5 - Ensaios de fluxo bidimensional

2.5.1 - Compactação do solo

O canal de fluxo foi preenchido em camadas, com alíquotas de 4,8 kg de solo, na umidade de 5%. Para atingir a massa específica seca desejada ($1,82 \text{ g.cm}^{-3}$) cada camada foi comprimida com um soquete de 4 kg até atingir a altura de 8 mm.

Após a realização dos ensaios de infiltração, foram coletadas amostras utilizando-se anéis de Kopect (ver Figura 5c) e amostradores cilíndricos (comprimento de 15 cm e diâmetro interno de $\frac{1}{4}$ de polegada) (Figura 5b), para conferência da massa específica seca e da umidade de compactação, respectivamente. As amostras destinadas à obtenção da umidade de compactação foram retiradas de regiões laterais, onde os tensiômetros não indicaram mudança de sucção durante os ensaios.

As Figuras 6a e 6b apresentam resultados de massa específica seca em diferentes pontos do canal para os ensaios de infiltração de água e do diesel, respectivamente. O Quadro 8 apresenta os índices físicos obtidos em cada ensaio.

As Figuras 6a e 6b mostram que as massas específicas secas médias do solo nos dois ensaios foram similares, com valores de $1,617 \text{ g.cm}^{-3}$ para o ensaio com diesel e de $1,613 \text{ g.cm}^{-3}$ para o ensaio com água, correspondendo a cerca de 89% da massa específica seca máxima do solo estudado (ensaio de compactação, energia do Proctor Normal). Acredita-se que o valor de grau de compactação abaixo do especificado tenha ocorrido devido às deformações das paredes laterais do canal durante a compactação, as quais tendem a aumentar o volume de solo compactado, reduzindo assim a energia de compactação e os valores de densidade seca.



Fig. 5a - Fundo do canal de fluxo com tensiômetros instalados; 5b - Amostragem após ensaio para determinação da umidade nos pontos de localização dos tensiômetros; 5c - Amostragem após ensaio para conferência do grau de compactação.

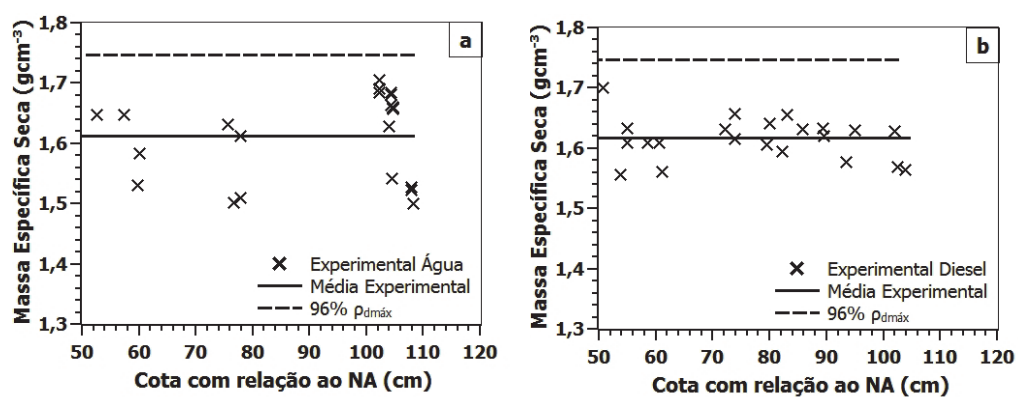


Fig. 6a- Massa específica seca- Ensaio de infiltração bidimensional de água. – 6b Ensaio de infiltração bidimensional de diesel.

Quadro 8 - Índices físicos do solo compactado no canal instrumentalizado.

Fluido	Massa específica dos grãos (g.cm ⁻³)	Massa específica seca média (g.cm ⁻³)	Índice de vazios (-)	Porosidade (%)	Umidade (%)
Diesel	2,657	1,617	0,643	39,1	5,03
Água	2,657	1,613	0,648	39,3	5,75

2.5.2 - Ensaio de Infiltração Bidimensional com Diesel

Após a compactação do solo no canal, os tensiômetros hidrofóbicos e hidrofílicos, devidamente saturados com diesel e água, respectivamente, foram colocados em contato com o solo na sua parte posterior (Figura 5a). Nas laterais do canal foram instalados dois permeâmetros Guelph para simular o lençol freático, mantendo o nível constante em 5 cm da base do canal, com a liberação da água após a passagem da frente infiltrante pelo penúltimo tensiômetro (11G). Na parte central superior foi cravada a caixa de infiltração responsável por manter uma carga hidráulica de 2 cm na superfície do solo (Figura 4).

Após a instalação da instrumentação, o ensaio foi iniciado com o monitoramento do avanço da frente infiltrante, realizado por tensiometria (parte traseira) e por visualização e marcação das isócronas de avanço da frente de infiltração na parede de vidro do canal (parte frontal), que ao

Ensaio de Infiltração de Diesel

Escala em Centímetros

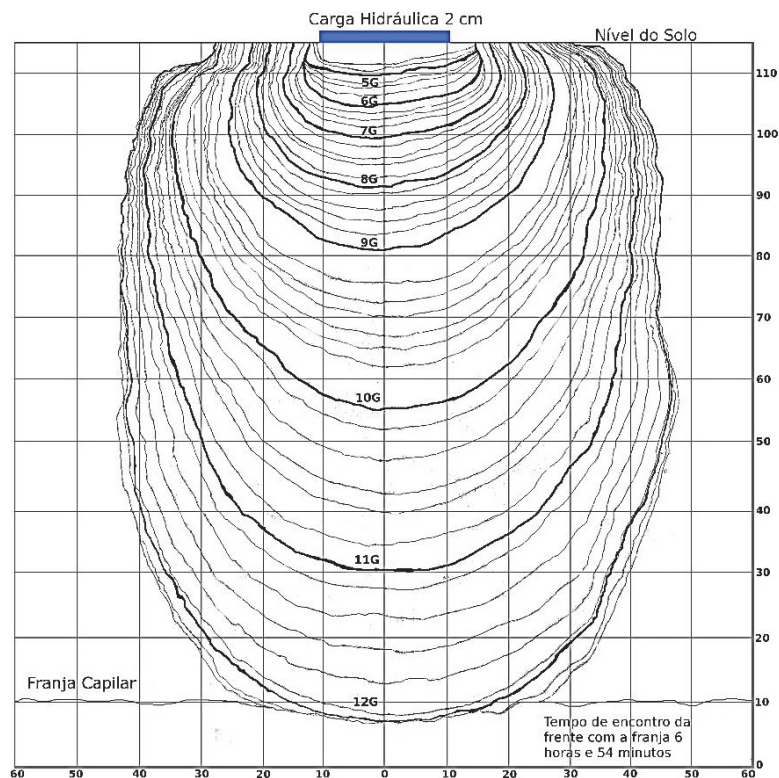


Fig. 7 – Isócronas de avanço do fluxo bidimensional de diesel.

final do ensaio foram decalcadas em papel vegetal. Durante o ensaio, que teve duração de 6h e 40min, as medidas de sucção foram monitoradas pelo sistema de aquisição de dados.

As isócronas de avanço da frente infiltrante de diesel traçadas na parede frontal do canal, do início do ensaio até o momento de encontro com a franja capilar, são mostradas na Figura 7. Pode-se notar um espalhamento horizontal e vertical uniforme, o que evidencia o eficiente procedimento de compactação. Por sua vez, o acentuado espalhamento lateral obtido é típico de processos de migração de fluidos orgânicos, como observado por Sharma e Mohamed (2003) e Sousa (2012) em experimentos de infiltração realizados em areia com óleo mineral e óleo diesel, respectivamente. Também se observa que o espalhamento máximo de diesel (cerca de 50 cm em relação ao centro do canal) ficou 32% acima do valor obtido por Sousa (2012) para o caso de ensaios realizados em areia de duna seca. Este comportamento resulta possivelmente, não somente do tipo do solo estudado (maiores valores de sucção), como também da presença de água nos poros (5% de umidade), forçando o diesel a espalhar-se lateralmente.

As Figuras 8a a 8d apresentam as leituras dos tensiômetros hidrofílicos (5A a 12A) e hidrofóbicos (5G a 12G) instalados na região posterior central do canal. Os tensiômetros de diesel responderam de forma esperada conforme a passagem da frente infiltrante, apesar do tensiômetro 10G apresentar uma pequena oscilação no momento da resposta, possivelmente por problemas de saturação.

Embora todo solo tenha uma umidade média em torno de 5%, nota-se através das respostas dos tensiômetros hidrofílicos (Figuras 8a e 8c) que a sucção inicial do solo não foi a mesma em todas as posições, possivelmente devido ao solo apresentar curva de retenção com característica bimodal. A sucção inicial do solo à água variou de 39 kPa a 4 kPa com média de 22 kPa.

Comparando-se as Figuras 8a e 8c nota-se que os tensiômetros com água, no momento da passagem da frente de diesel mantiveram-se inalterados, conforme o esperado. As alterações

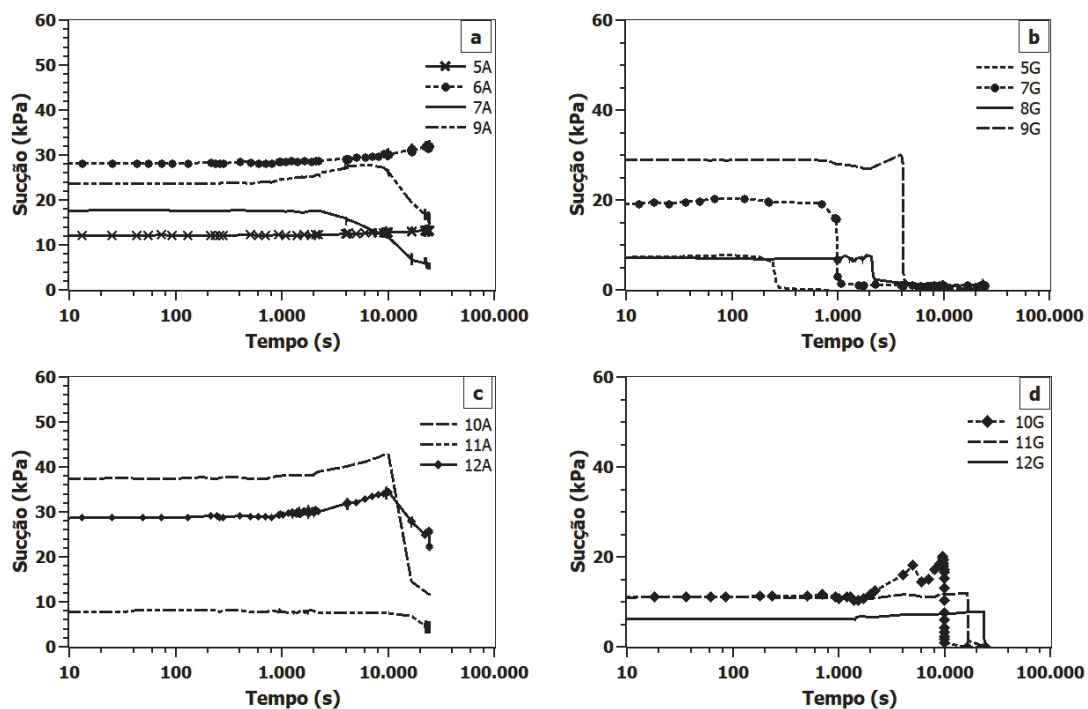


Fig. 8 - Resposta dos tensiômetros no ensaio de infiltração do diesel (a e c) - Tensiômetros com água; (b e d) - Tensiômetros com diesel

verificadas ao final do ensaio nos tensiômetros 10A, 11A e 12A devem-se à redução da sucção à água diante da chegada da franja capilar, em ascensão desde o momento em que a água foi liberada na base do canal pelos permeâmetros Guelph. Já as alterações verificadas nos tensiômetros 7A e 9A podem não estar associadas ao fluxo, possivelmente devem se tratar de falhas nos instrumentos ao final do ensaio.

2.5.3 - Ensaio de Infiltração Bidimensional de Água

O ensaio de infiltração de água procedeu-se de forma similar ao ensaio de infiltração de diesel (item 2.5.2), todavia neste ensaio foram utilizados apenas tensiômetros hidrofílicos (um total de 13), instalados após a compactação do solo, executada em 15 dias.

O experimento de avanço da frente infiltrante de água teve duração de 2h e 53 min e a abertura da água para simular o lençol freático ocorreu às 2h e 34 min após o início do ensaio. Como o solo ensaiado apresentava um teor de umidade inicial de 5%, o baixo contraste da frente infiltrante de água dificultou o traçado das isócronas de avanço da frente infiltrante, cuja visualização só foi possível com o auxílio de iluminação direta.

Foram desenhadas 30 isócronas até o encontro da frente infiltrante de água com a franja capilar. Como mostra a Figura 9, o espalhamento da frente infiltrante foi simétrico e atingiu o valor máximo de 51 cm em relação ao centro do canal, que corresponde ao instante de encontro da frente infiltrante com a franja capilar (2 h e 53 min).

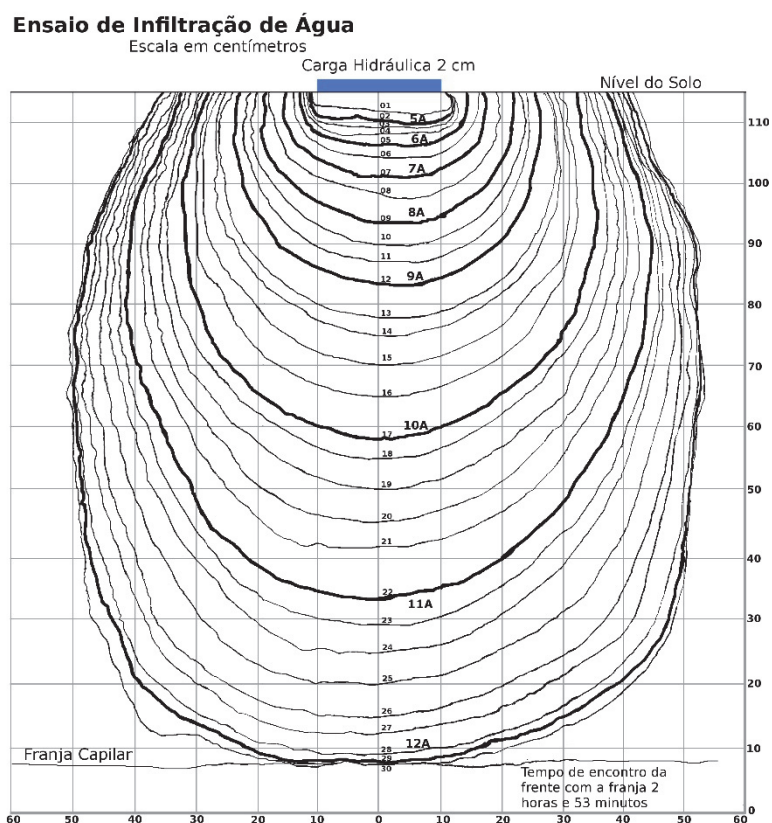


Fig. 9 - Isócronas de avanço do fluxo bidimensional de água.

A Figura 10 apresenta as respostas dos tensiômetros utilizados no ensaio de infiltração de água, onde se observa que eles responderam conforme esperado, apresentando decréscimo no valor de sucção com a passagem da frente infiltrante por sua posição. O tensiômetro 12A, não foi capaz de detectar a passagem da frente infiltrante, possivelmente por falha do instrumento, assim, o avanço da frente infiltrante no final do ensaio foi estabelecido por análise visual na parte frontal do canal.

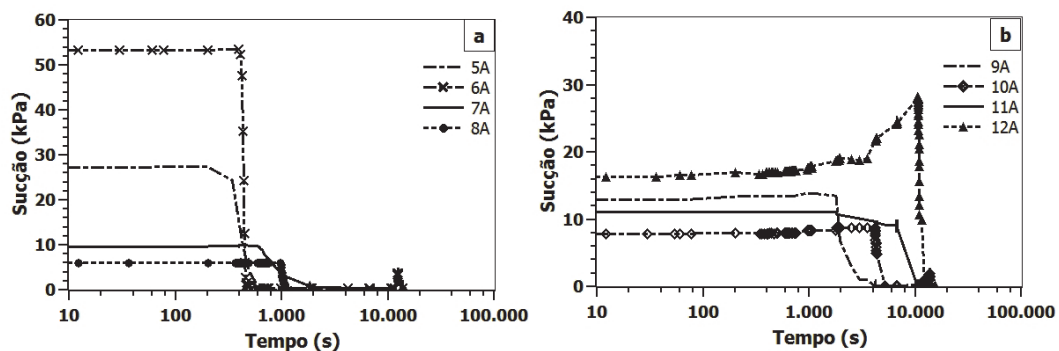


Fig. 10- Resposta dos tensiômetros no ensaio de infiltração de água, **(a)** instalados do meio para topo; **(b)** - Resposta do meio para a base do canal.

O sistema de tensiometria mostrou-se eficiente para detecção das frentes infiltrantes de diesel e de água nos experimentos realizados. Como já reportado por outros autores (van Geel e Sykes, 1994 e Sousa, 2012), a junção das técnicas de tensiometria e análise visual possibilitam um adequado monitoramento da passagem das frentes infiltrantes.

Para efeito de comparação, apresentam-se na Figura 11 algumas isócronas obtidas nos ensaios de fluxo de água e de diesel, evidenciando o espalhamento lateral em ambos os ensaios.

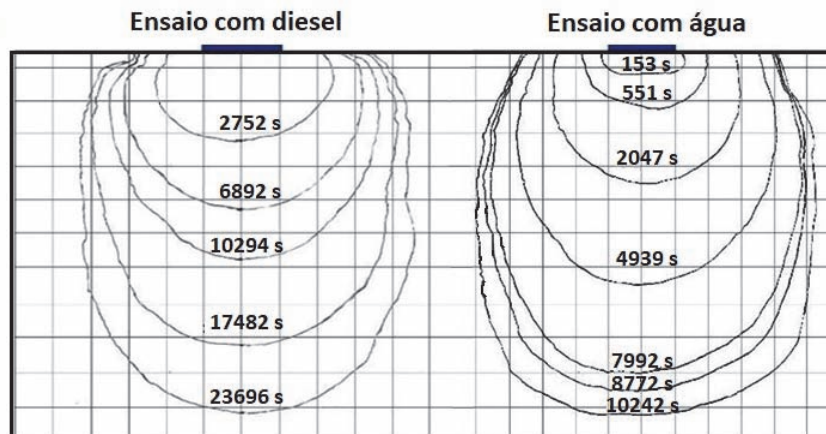


Fig. 11. Comparação das frentes infiltrantes nos ensaios de água e de diesel.

As frentes infiltrantes de água e diesel mostradas na Figura 11 foram obtidas neste trabalho, nos experimentos do canal de fluxo bidimensional preenchido com solo areno siltoso (com 20% de finos e a presença de caulinita, argilomineral bilaminar de baixa plasticidade, indicando um solo inativo). Essas frentes podem ser comparadas com as isócronas do trabalho de Sousa (2012), para os mesmos líquidos (água e diesel), obtidas no mesmo canal de fluxo preenchido com uma areia

de duna. O Quadro 9 apresenta resultados obtidos nos dois trabalhos, além de propriedades dos líquidos, para servir de comparação.

Quadro 9 – Resultados de ensaios de infiltração de diesel e de água obtidos neste trabalho e os publicados por Sousa, 2012 e Sousa *et al* (2019).

Solo/ Autor	Fluído	Parâmetros								
		k (cm.s ⁻¹)	t_{cheg} (s)	r (cm)	k_w/k_d (-)	t_d/t_w (-)	r_w/r_d (-)	M_d/M_w (-)	σ_w/σ_d (-)	$(M_d/\sigma_d)/(M_w/\sigma_w)$ (-)
Areia siltosa deste trabalho	Diesel	1,78x10 ⁻³	23696	35	1,62	2,31	1,51	5,8	2,68	2,16
	Água	2,89x10 ⁻³	10242	53						
Areia Sousa, 2012	Diesel	5,4x10 ⁻³	12842	23	4,81	5,5 à 7,3	0,54	5,5	2,68	2,05
	Água	2,6X10 ⁻²	1758	12,5						

r , distância radial do centro do canal à borda da isócrona; t_{cheg} , tempo de chegada da frente de infiltração ao lençol freático; $M=p/\mu$, mobilidade do fluido; σ , tensão superficial.

Enquanto (k_w/k_d) obtido na areia siltosa tem valor (1,62), para a areia de duna o valor é (4,81). Quanto à razão (t_d/t_w) dos tempo de chegada, na areia siltosa é (2,31) e na areia de duna é (5,5-7,3). Observa-se que na areia de duna estas razões se aproximam da razão das mobilidades dos líquidos (5,5) ou seja, a mobilidade do líquido, sozinha, responde pelas diferenças do fluxo da água em relação ao diesel na areia de duna.

O trabalho de Oliveira (2001) investigando a permeabilidade de meios porosos constituídos de frações de areia e argilominerais (bentonita e caulinita), também para água e diesel (entre outros líquidos), comprovou que na areia com teor de caulinita de 10%, a razão entre os tempos de chegada do diesel e da água de (2,7), também não foi compatível com a razão entre as mobilidades dos fluidos (5,5), como verificado nos trabalhos em areia de Schwille (1967) e Sousa (2012). Por outro lado, a razão obtida em Oliveira (2001) é compatível com o valor encontrado neste trabalho (2,31), desde quando ambos os solos são constituídos de finos, com a presença da caulinita. Assim, se a presença de finos responde pelas diferenças do fluxo da água em relação ao diesel, tanto no trabalho de Oliveira (2001), quanto neste trabalho, então, tem-se que a mobilidade dos líquidos (p/μ) atua favoravelmente ao fluxo, enquanto a tensão superficial (propriedade do fluido presente na equação da capilaridade), atua retardando a descida vertical dos fluidos, devido ao espalhamento lateral. No Quadro 9 vê-se que a razão das propriedades dos líquidos ($p/\mu/\sigma$) que neste trabalho é (2,16), também é compatível com a razão dos tempos de chegada (t_d/t_w) que é (2,31).

Portanto, o comportamento das isócronas da água e do diesel são adequadamente explicadas pelo efeito conjunto da gravidade e do atrito na descida vertical dos líquidos, representado pela mobilidade (p/μ), e o espalhamento lateral pelo efeito da capilaridade, comandada pela tensão superficial (σ). Segundo o Quadro 9, no trabalho de Sousa (2012) a razão do espalhamento lateral (r_w/r_d) foi de (0,54), ou seja, o diesel espalhou quase o dobro, com relação à água, e no solo siltoso, o espalhamento se inverte, e a água se espalha por uma razão (1,51). Pela Figura 11, a distância radial da borda da pluma ao centro do canal é (53 cm) para a água, e (35 cm) para o diesel, para um tempo similar de chegada (cerca de 10200s). Assim sendo, a razão entre os tempos de chegada para o solo com finos está melhor relacionada à razão da mobilidade e tensão superficial dos líquidos, enquanto que nos solos granulares, a mobilidade sozinha é o fator preponderante.

2.6 – Simulação unidimensional do fluxo de água e do fluxo de diesel

Para simulação do avanço da frente infiltrante (L) de diesel e de água foram utilizadas equações de fluxo unidimensional, apresentadas no Quadro 1 (Green e Ampt, 1911; Philip, 1969;

Brutsaert, 1977) juntamente com a equação 5, proposta por Sousa (2012) para corrigir a distorção dos resultados obtidos com a equação de Philip (1969), devido ao espalhamento lateral. As Figuras 12 e 13 mostram os resultados das simulações da frente infiltrante para diesel e água, respectivamente e os parâmetros utilizados estão apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Parâmetros utilizados nas simulações das frentes infiltrantes do diesel e da Água.

Fluido	Modelo	$\theta_s - \theta_i$ (-)	k (cm.s ⁻¹)	h_p (cm)	h_f (cm)	Sp (cm.s ^{-1/2})	β (-)
Diesel	Green e Ampt (1911)	0,31	$1,78 \times 10^{-3}$	2	137,2	-	-
	Brutsaert (1977)	0,31	$1,78 \times 10^{-3}$	2	137,2	0,1536	1
	Philip (1969)	0,31	$1,78 \times 10^{-3}$	2	137,2	-	-
	Philip (1969) Corrigido	1,38	$1,78 \times 10^{-3}$	2	137,2	-	-
Água	Green e Ampt (1911)	0,30	$2,89 \times 10^{-3}$	2	171,3	-	-
	Brutsaert (1977)	0,30	$2,89 \times 10^{-3}$	2	171,3	0,3005	1
	Philip (1969)	0,30	$2,89 \times 10^{-3}$	2	171,3	-	-
	Philip (1969) Corrigido	1,53	$2,89 \times 10^{-3}$	2	171,3	-	-

As Figuras 12 e 13 mostram que, independente do fluido infiltrante, as simulações com a equação de Brutsaert (1977) apresentam um considerável atraso no tempo de avanço da frente infiltrante com relação ao dado experimental (erro em torno de 60 % nos dois ensaios). Mas, com a equação de Philip (1969) a simulação mostra um elevado adiantamento em relação aos dados experimentais (130% para água e 170% para o diesel). Quanto à equação de Green e Ampt (1911), as simulações apresentaram erro de 12,5% para diesel e 30% para água. Por outro lado, inserindo-se a correção para a porosidade (decorrente do espalhamento lateral) segundo a proposta de Sousa (2012) e Sousa *et al* (2019), no modelo para o fluxo vertical de Philip (1969) as simulações se aproximam do resultado experimental, com similaridade até 8000 s para o ensaio com diesel. Uma justificativa para a falta de aderência entre as simulações e os dados experimentais resulta do fato dos modelos terem sido elaborados para descrever fluxo unidimensional, onde o efeito do espalhamento não ocorre. O modelo de Green Ampt (1911) é mais adequado para solos granulares com fluxo em carga constante, e o de Philip (1969) para solos com finos e frente difusa. Corrigindo-se o modelo de Philip (1969) para considerar o espalhamento lateral, a simulação melhora, resultando em erros da ordem de 10% (com retardo para o diesel e avanço para a água). Ou seja, como o solo tem finos, o modelo de Philip (1969) corrigido, resulta em melhor previsão.

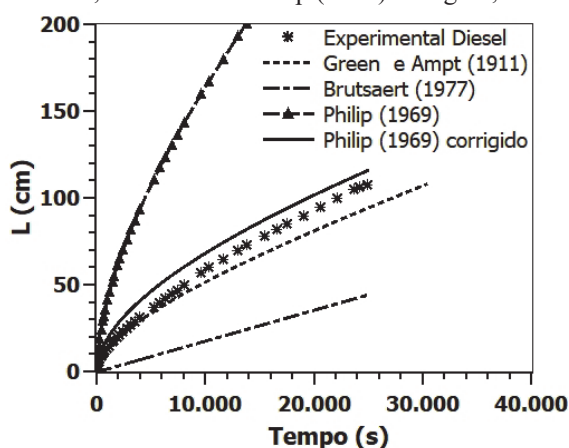


Fig. 12 –Avanço da frente infiltrante de diesel obtido experimentalmente e por simulação empregando modelos unidimensionais.

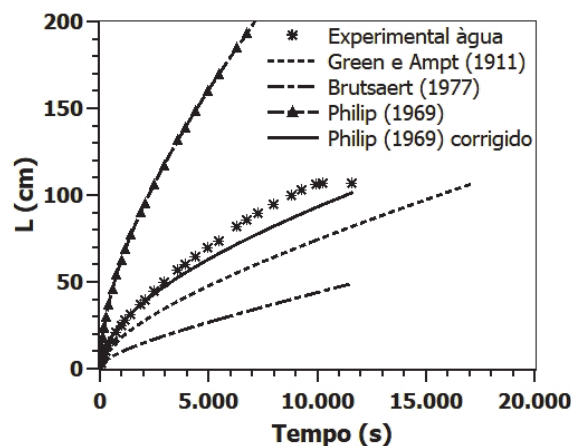


Fig. 13. Avanço da frente infiltrante de água obtido experimentalmente e por simulação empregando modelos unidimensionais.

3 - CONCLUSÕES

Os ensaios de fluxo bidimensional de água e diesel em solo areno siltoso compactado, com 5% de umidade, em canal instrumentalizado apresentaram migração uniforme nas direções horizontal e vertical do canal, com espalhamento simétrico das frentes infiltrantes, revelando um elevado grau de homogeneidade na compactação, também ratificado pelos valores de densidade seca obtidos em diferentes pontos do canal. As isócronas de avanço da frente infiltrante diferiram apenas no tempo de chegada em posições especificadas, devido à hidrodinâmica dos fluidos e aos seus coeficientes de permeabilidade. A razão entre o tempo de chegada das frentes infiltrantes do diesel e da água à franja capilar (t_d/t_w) foi de 2,3, compatível com a razão das propriedades dos líquidos ($\rho/\mu/\sigma$) que neste trabalho é (2,16). Portanto, o comportamento das isócronas de água e de diesel é adequadamente explicado pelo efeito conjunto da gravidade e do atrito na descida vertical dos líquidos, representado pela mobilidade (ρ/μ), e o espalhamento lateral pelo efeito da capilaridade, comandada pela tensão superficial (σ).

O emprego de modelos unidimensionais para simular o avanço da frente infiltrante bidimensional, independente do fluido percolante, conduziu a um considerável atraso no tempo de chegada da frente quando se aplica a equação de Brutsaert (1977), enquanto a equação de Philip (1969) proporcionou um elevado adiantamento. O uso do modelo de Green Ampt (1911) conduz a resultados próximos do experimental, mas o modelo de Philip (1969) corrigindo o espalhamento lateral, segundo a proposta de Sousa (2012), apresenta melhor aderência aos dados experimentais, com erro de cerca de -10% (retardo) para o ensaio de diesel e +10% (avanço) para o ensaio de água. Ou seja, como o solo tem finos, o modelo de Philip (1969) corrigido, resulta em melhor previsão.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a Capes pelas bolsas e pelo fomento à pesquisa e ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA pelo suporte oferecido.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT: NBR 6457 (1986). *Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 6459 (1984). *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 6508 (1984). *Grãos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 7180 (1984). *Solo: Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 7181 (1984). *Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 7182 (1986). *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT: NBR 14545 (2000). *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Abriola, L. M.; Pinder, G. F. (1985). *A multiphase approach to the modelling of porous media contamination by organic compounds: 1. Equation development*. Water Resources Research, v.21, n°1, pp.11-18.
- ASTM D323 (2006). *Standard Test Method for Vapour Pressure of Petroleum Products (Reid Method)*.
- Bacchi, O. O. S.; Reiechart, K.; Vila Nova, N. A. (1996). *Fractal scaling of particle and pore size distributions and relation to soil hydraulic conductivity*. Science Agricultural, v.53, n°2, pp.356-361.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology papers, n.3, 27f. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Brown, K. W.; Thomas, J. C. (1984). *Conductivity of three commercially available clays to petroleum products and organic solvents*. J. of Hazardous Waste, v.1, pp.545-553.
- Brutsaert, W. (1977). *Vertical infiltration in dry soil*. Water Resource Research, v.13, n°2, pp.481-483.
- Budhu, M.; Giese JR., R. F.; Campbell, G.; Baumgrass, L. (1991). *The permeability of soils with organics fluids*. Canadian Geotechnical Journal, v.28, pp.140-147.
- Busby, R. D.; Lenhard, R. J.; Rolston, D. E. (1995). *An investigation of saturation capillary pressure relations in two-and-three fluid systems for several NAPLs in different porous media*. Ground Water, v.33, n°4, pp.570-578.
- Cardoso, L.S.P., Machado, S. L., Oliveira, I.B. (2011). *Determinação experimental da permeabilidade efetiva de fluidos imiscíveis em sistemas bifásicos*. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Nsat 2011, Pirinópolis, Goiânia.
- Carducci, C. E.; Oliveira, G. C.; Severiano, E. C.; Zeviani, W. M. (2011). *Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação Duplo van Genuchten*. Revista Brasileira Ciência do Solo, v.35, pp. 77-86.
- Catalan, L.J.J; Dullien, F.A.L. (1995). *Application of gravity drainage to the recovery of residual LNAPL in homogeneous and lensed sand packs*. Journal of Contaminant Hydrology, v.18, n°4, pp.279-306.

- Chevalier, L. R.; Wallace, R. B.; Wiggert, D. C. (1998). *Impact of surfactant on configuration of petroleum hydrocarbon lens*. Journal of Soil Contamination, v.7, n°.3, pp.395-414.
- Conciani, W.; Herrmann, P. S.; Soares, M. M. (1996). *The time domain reflectometry to study matrix suction*. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils. UNSAT'95. 6-8 September 1995, v.3.Paris, France.
- Delerue, J. F.; Perrier, E. (2002). *DXSoil, a library for 3D image analysis in soil science*. Computers & Geosciences, v.28, n°.9, pp.1041-1050.
- Fernandez, F.; Quigley, R.W. (1985). *Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons*. Canadian Geotechnical Journal, v.22, n°.2, pp.205-214.
- Feuerharmel, C; Gehling, W.Y.Y.; Bica, A.V.D.; Pereira, A. (2004) *Determinação das curvas características de solos coluvionais pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel de filtro*. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, pp.243-248, São Carlos.
- Ghildyal, B. P.; Tripathi, R. P. (1987). *Soil physics: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, 656pp, New York.
- Green, W. H.; Ampt, G. A. (1911). *Studies on Soil Physics*. The Journal of Agricultural Science, v.4, n°.1, pp.1-24.
- Hettiaratchi, J. P. A. and Hruday, S. E. (1987). *Influence of contaminant organic-water mixtures on shrinkage of impermeable clay soils with regard to hazardous waste landfill liners*. Hazardous Waste e Hazardous Materials, v.4, n° 4, pp.377-388.
- Kaluarachi, J. J.; Parker, J. C. (1989). *An efficient finite element method for modelling multiphase flow*. Water Resources Research, v.25, n°.1, pp.43-54.
- Jury, W. A.; Gardner, W. R.; Gardner, W. H. (1991). *Soil Physics*. John Wiley & Sons, 328pp., New York, USA.
- Kamaruddin, S.A., Sulaiman, W.N.A., Rahman, N.A., Zakaria, M.P., Mustaffar, M. and Sa'ari, R. (2011). *A Review of Laboratory and Numerical Simulations of Hydrocarbons Migration in Subsurface Environments*. Journal of Environmental Science and Technology, v.4, n°.3, pp.191- 214.
- Kechavarzi, C.; Soga, K.; Illangasekare, T. H. (2005). *Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone*. Journal of Contaminant Hydrology, v.76, n°.3-4, pp.211-233.
- Kererat, C; Sasanakul, I.; Soralump, S. (2013). *Centrifuge modelling of LNAPL infiltration in granular soil with containment*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.139, n°.6, pp.892-902.
- Kueper, B. H.; Abbott, W.; Farquhar, G. (1989). *Experimental observations of multiphase flow in heterogeneous porous media*. Journal of Contaminant Hydrology, v.5, n°.1, pp.83-95.
- Lenhard, R. J.; Parker, J. C. (1988). *Experimental validation of theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths*. Water Resource Research, v.4, n°.3, pp.373-380.
- Libardi, P. L. (2005). *Dinâmica da água no solo*. Editora EDUSP - Universidade de São Paulo. 335pp., São Paulo.

- Machado, S. L.; Dourado, K. A. (2001). *Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo*. 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, pp.325-336, Porto Alegre.
- Mahler, C. F.; Oliveira L. C. D. (1998). *Measurement of matrix and total in situ suction of porous soils of São Paulo using the filter-paper method*. Proc. of the 2st nt. Conf. on Unsaturated Soils, pp.402-409.
- McDowell, C. J.; Powers, S. (2003). *Mechanisms affecting the infiltration and distribution of ethanol-blended gasoline in the vadose zone*. Environmental Science e Technology, v.37, nº.9, pp.1803-1810.
- Oliveira, I. B. (1995). *Infiltration of organic liquids in unsaturated sands: comparison of experimental measurements with scaled and unscaled analytical solutions*. 335f. Tese (Doctor Philosophy in Environmental Engineering), Universidad of Michigan. Ann Arbor, Michigan, USA.
- Oliveira, J. C. S. (2001). *Contaminação de sedimentos argilosos por combustíveis automotivos. Problema de avaliação da permeabilidade*. 102 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador.
- Oliveira, O. M.; Marinho, F. A. M. (2004). *Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado*. V. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, pp.279-288, São Carlos.
- Oostrom, M.; Dane, J. H.; Wietsma, T. W. (2007). *A review of multidimensional, multifluid, intermediate-scale experiments: Flow behavior, saturation imaging, and tracer detection and quantification*. Vadose Zone Journal, v.6, nº.3, pp.610-637.
- Oostrom, M.; Hofstee, C.; Lenhard R. J.; Wietsma, T. W. (2003). *Flow behavior and residual saturation formation of liquid carbon tetrachloride in unsaturated heterogeneous porous media*. Journal Contaminant Hydrology. v.64, pp.93-112.
- Oostrom, M.; Hofstee, C.; Wietsma, Thomas W. (2006). *Behavior of a viscous LNAPL under variable water table conditions*. Soil e Sediment Contamination, v.15, nº.6, pp.543-564.
- Perry, R. H.; Chilton, C. H. (1973). *Chemical engineering's handbook*. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- Philip, J. R. (1957). *Theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution*. Soil Sci, 83, nº 5, p. 345-357.
- Philip, J. R. (1969). *Theory of infiltration*. Advances in Hydrosience. Elsevier. v.5, pp.215-296.
- Scheidegger, A. E. (1974). *The physics of flow through porous media*. Edition 3, reprint. Publisher University of Toronto Press, pp.353.
- Schramm, M.; Warrick, A. W.; Fuller W. H. (1986). *Permeability of soils to four organic liquids and water*. Hazardous Waste e Hazardous Materials, v.3, nº.1, pp. 21-27.
- Schwille, F. (1967). *Petroleum contamination of the subsoil—A hydrological problem*. P.Hepple Ed., Joint Problems of the Oil and Water Industries, pp.23-54, London.
- Sharma, R. S.; Mohamed, M. HA. (2003). *An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand*. Engineering Geology, v.70, n.3-4, pp.305-313.
- Soto, M. A. A.; Kiang, C. H.; Vilar, O. M. (2008). *Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros*. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 2, p. 253-262.

- Sousa, R. P. (2012). *Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados: Desenvolvimento experimental e modelagem matemática*. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Sousa, R. P.; Oliveira, I. B.; Machado, S. L.; Sales, E. A. (2019). *Modelling of two-dimensional infiltration experiments of water or diesel oil in an instrumented 2D channel*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: 10.1080/19648189.2019.1587518.
- Su, C.; Brooks, R. H. (1980). *Water retention measurement for soils*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, v.106, n°.IR2, pp.105-112.
- van Geel, P. J.; Sykes, J. F. (1994). *Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in variably-saturated sand. 1. Laboratory experiment and image analysis techniques*. Journal Contaminated Hydrology, v.17, pp.1-25.
- van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, v.44, n° 5, pp.892-898.
- Vargaftik, N. B.; Volkov, B. N.; Voljak, L. D. (1983). *International tables of the surface tension of water*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, v.12, n°.3, pp.817-820.
- Wiplfer, R. L.; Ness, M.; Bredveld, G. D.; Marsman, A.; Van Der Zee, S. E. (2004). *Infiltration and redistribution of LNAPL into unsaturated layered porous media*. Journal Contaminated Hydrology, v.71, pp.47-66.