

# INFILTRAÇÃO 2-D EM AREIA NÃO SATURADA: DESENVOLVIMENTO DO CANAL DE FLUXO, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E MODELAGEM MATEMÁTICA.

## INFILTRATION 2-D IN UNSATURATED SAND: FLOW CHANNEL DEVELOPMENT, EXPERIMENTAL RESULTS AND MATHEMATICAL MODELING.

Sousa, Riseuda Pereira de; *Programa de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, riseuda.sousa@gmail.com.*

Oliveira, Iara Brandão de; *Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, oliveira@ufba.br.*

Machado, Sandro Lemos; *Departamento de Ciências e Tecnologias dos Materiais, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, smachado@ufba.br.*

Sales, Emerson Andrade; *Departamento de Físico-química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, eas@ufba.br.*

### RESUMO

Este artigo apresenta resultados experimentais da infiltração bidimensional de água em areia de duna não saturada, para testar um canal de fluxo instrumentalizado, especialmente desenvolvido para estudos do fluxo multifásico de líquidos orgânicos automotivos na zona vadosa. O canal, manufaturado em aço inoxidável e vidro, possui acoplamentos para instalação de tensiômetros conectados a sistema de aquisição de dados. Um reservatório de fundo poroso libera o líquido no solo. Os testes comprovaram a eficiência dos tensiômetros medirem a tensão intersticial na frente líquida no intervalo de três segundos; a ocorrência da conexão hidráulica entre o fundo poroso do reservatório e o solo; a possibilidade do monitoramento visual do experimento com registro das posições verticais da frente líquida em função do tempo. A modelagem matemática da infiltração com a equação de Philip dois e três termos mostrou-se adequada para o fenômeno.

### ABSTRACT

This paper presents experimental results of two-dimensional water infiltration in unsaturated dune sand, to test an instrumented flow channel, specially developed for studies on multiphase flow of automotive organic liquids in vadose zone. The channel, manufactured in stainless steel and glass, has couplings for installation of tensiometers connected to data acquisition system. A reservoir with porous bottom releases the liquid on the topsoil. The tests proved the efficiency of tensiometers to measure the suction at the wetting front in three seconds; the hydraulic connection between the reservoir porous bottom and the soil; the possibility of visual monitoring of the experiment to register the vertical positions of the wetting front as the function of time. The mathematical modeling using the infiltration equation of Philip with two and three terms proved to be adequate for the phenomenon.

### 1 - INTRODUÇÃO

A literatura registra um grande número de pesquisas, de natureza teórica e experimental, efetuadas com o intuito de descrever o fluxo e transporte de solutos e, das fases líquidas não-aquosas - NAPL (*Non-Aqueous Phase Liquid*), tanto na zona não saturada do solo, como na região da franja capilar e no aquífero (Abriola e Pinder 1985), (Abriola, 1989), (Kaluarachchi e Parker, 1989).

A capacidade de previsão dos modelos matemáticos e numéricos, de um modo geral, precisa ser comprovada com dados obtidos em laboratório ou campo. Neste aspecto, Kueper *et al.* (1989) destacou a necessidade da compreensão do fluxo multifásico sob várias condições hidrogeológicas, demandando, para isso, vários estudos experimentais. O trabalho de Silliman *et al.* (2002), aborda experimentos bidimensionais do transporte de solutos na franja capilar, em meios porosos homogêneos e heterogêneos, enquanto, Kamon (2004) tratou da caracterização do fluxo de DNAPL na zona saturada, considerando, ou não, o fluxo da água subterrânea.

Com relação a estudos em condições de laboratório, o estudo de fluxo bidimensional realizado por McDowell e Powers (2003) analisou o espalhamento da gasolina e da gasolina com 10% de álcool em volume, na zona vadosa e franja capilar, com ênfase na observação do fenômeno de particionamento do etanol nestes ambientes. Os experimentos laboratoriais, em canal de fluxo, de Schiegg (1990), Host-Madsen e Jensen (1992), Oliveira (1995), Butts e Jensen (1996), Schroth *et al.* (1998), Kamon *et al.* (2004) e Kechavarzi *et al.* (2000, 2005, 2008) utilizaram diversas técnicas para a medida de parâmetros de transporte. Os pesquisadores Oostrom (2007) e Kamaruddin *et al.* (2011) fizeram uma revisão

abrangente de trabalhos laboratoriais e numéricos sobre a migração de hidrocarbonetos em ambiente subsuperficial. Esses autores destacam, entre outras, as técnicas utilizadas para a medida dos parâmetros de transporte. Dentre as técnicas não invasivas para determinação da umidade no solo foram relatadas: atenuação de raio gama e de raios-X; transmissão e reflexão de luz visível; método de análise multiespectral de imagem; método de radar no solo (GPR) e métodos sísmicos tridimensionais. Dentre as técnicas invasivas para a medida da sucção no solo estão a tensiometria e a condutividade elétrica. Nessas pesquisas foi investigado o fluxo de diversos líquidos, tais como: água, etileno glicol, 4-clorotolueno, n-hexanol, óleo mineral, hidrofluoreto, hidrofluoreter, gasolina, BTEX, Soltrol 220® e Jet Fuel, em diferentes tipos de solos, e, com ênfase nos fenômenos de infiltração e redistribuição de DNAPL (dense non aqueous phase liquid) e LNAPL (light non aqueous phase liquid); geometria das plumas e lentes de contaminantes; fluxo com instabilidade na frente líquida e transporte de vapor, entre outros.

Este trabalho envolve o desenvolvimento laboratorial de um canal de fluxo instrumentalizado para estudo e modelagem matemática do fluxo bidimensional de combustíveis automotivos (LNAPL) em solos não saturados da Região Metropolitana de Salvador: areia de duna (rica em quartzo, não reativa), dos cordões litorâneos de Salvador e de idade Quaternária, e os solos Regolito e da Formação Barreiras, com argila bilaminar (caulinita) e trilaminar (ilita), ambas medianamente reativas; bem como solo da cidade de Santo Amaro, um massapê, com argila trilaminar expansiva. Este artigo apresenta os resultados de testes realizados no canal instrumentalizado, referente à infiltração de água na areia de duna e, a modelagem matemática do fenômeno.

## 2 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A água utilizada nos experimentos de infiltração é a mesma distribuída pela concessionária, Empresa Baiana de Saneamento – EMBASA, em equilíbrio com a temperatura do laboratório e pressão atmosférica, e deixada em repouso para perda de cloro residual. A recomendação de utilizar-se água distribuída em experimentos de infiltração encontra-se em Philip (1969), Bond e Collins (1981) e Klute (1986). As propriedades da água à 25°C, de acordo com a literatura são: densidade,  $\rho=1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ ; viscosidade,  $\mu=1,0 \text{ cp}$ ; pressão de vapor,  $P_v=17,535 \text{ mmHg}$ ; constante dielétrica,  $\epsilon=80,0$ ; e tensão superficial,  $\sigma=72,75 \text{ dina.cm}^{-1}$ .

A Figura 1 mostra a curva granulométrica para a areia de duna utilizada nos experimentos, que apresenta teor de areia de 100%, tendo Classificação NBR 6502 – areia média a fina e, Classificação SUCS – SP areia mal graduada.

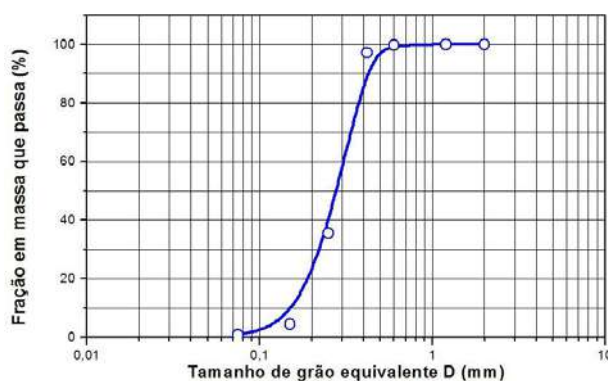


Figura 1 - Curva granulométrica da areia de duna

O coeficiente de permeabilidade à água, para a areia de duna utilizada nos experimentos foi obtido em permeâmetro de parede rígida, tendo um valor médio de  $1,20\text{E-}004 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$ .

## 3 - CANAL DE FLUXO INSTRUMENTALIZADO

### 3.1 - Canal de fluxo e protocolo de compactação do solo

O canal foi construído em aço inoxidável e vidro, com dimensões: largura 200 cm x altura 120 cm x espessura 15 cm (Figura 2).



Figura 2 - Canal de fluxo em processo de compactação da areia. Vista das barras de reforço da estrutura em aço na parte frontal, da parede de fundo revestida com epóxi, e da lateral para fixar tubo Mariotte.

A largura de 200 cm (13 vezes maior que a largura do reservatório para dispor o líquido sobre o solo) possibilitou uma condição de contorno similar a condições de campo. A altura de 120 permitiu a formação de um longo bulbo vertical e o espalhamento lateral no topo da franja capilar. A espessura de 15 cm seguiu a recomendação de Schiegg (1990) para evitar efeito de parede. O vidro temperado das laterais e frente do canal permitiu a visualização do experimento. As paredes laterais dispõem de aberturas na parte inferior para acomodar tubos Mariotte para aplicação da água e formação do nível freático na base do canal e franja capilar no solo. Uma calha metálica perfurada foi colocada na base do canal para facilitar a distribuição da água e formação da franja capilar. O aço inoxidável tipo 316 foi utilizado para dar resistência ao canal. Foi necessário acrescentar um reforço com barras de aço para corrigir e evitar novas deformações plásticas na porção central do canal (Figura 2), tendo em vista que, no segundo experimento, ocorreu a deformação.

O protocolo de compactação do solo foi estabelecido em modelo reduzido do canal de fluxo com semelhança geométrica e materiais similares aos utilizados na confecção do canal, utilizando a metodologia de Oliveira (1995). O protocolo de compactação, no canal de fluxo, envolve a deposição sucessiva de camadas de aproximadamente 2,0 kg de areia, no estado de terra fina seca ao ar (TFSA), distribuídas ao longo do canal e submetidas a uma série de 270 golpes, utilizando um socador metálico com 7 kg.

Devido à afinidade físico-química entre líquidos orgânicos e o aço, e, para evitar efeitos de parede, a superfície interna, base e parede de fundo do canal, foram revestidas com epóxi e recobertas por uma fina camada de areia para garantir a similaridade mineralógica ao meio poroso. Na Figura 2 fica visível a parede de fundo do canal revestida de massa epóxi e a estrutura lateral para fixar tubo Mariotte do permeâmetro Guelph.

Na parede de fundo do canal foram fixados 30 acoplamentos (Figura 3), para instalação de 30 tensiômetros, sendo 15 para leitura da sucção intersticial à água (A) e 15 para leitura da sucção ao NAPL (G).



Figura 3 - Vista da parede do fundo do canal, em aço inox, com os trinta acoplamentos para inserir os tensiômetros.

No topo do solo é colocado um reservatório instrumentalizado em aço para dispensar o líquido permeante, simulando um vazamento (Figura 4).



Figura 4 - Reservatório em aço, de fundo poroso, colocado no topo do solo e sistema acoplado para fornecimento do líquido ao reservatório.

O reservatório instrumentalizado com volume de 15 litros (Figura 4) foi confeccionado em aço inox 304 com altura de 50 cm e base de  $15 \times 20 \text{ cm}^2$  em bronze sinterizado poroso com abertura nominal de  $5,0 \mu\text{m}$  (Filtros Free Ind. Com. Ltda, São Paulo-SP). Um revestimento em lona, no formato de coluna, foi colocado no interior do reservatório de aço objetivando manter a vazão do líquido em taxa adequada à admissão na areia. Na posição lateral inferior do reservatório foi instalado um piezômetro para leitura do nível do líquido durante o experimento. Um recipiente acoplado ao reservatório de fundo poroso, através de tubos de teflon de 12,7 mm, garante o suprimento do líquido, ao acionar uma válvula esfera de passagem plena para permitir o rápido preenchimento do reservatório (Figura 4).

### 3.2 - Tensiômetro e sistema de aquisição de dados.

A Figura 5 mostra o tensiômetro do tipo diafragma (Marca MKGPT 1000, MK Controle e Instrumentação LTDA-EPP, São Paulo-SP) utilizado nos experimentos.



Figura 5 - Tensiômetro de baixa capacidade e luva de acoplamento com ponta porosa.

O tensiômetro é constituído de transdutor de pressão, com faixa de leitura de sucção de 0 a 100 kPa, acoplado a uma luva em aço inox 316, com ponta porosa para ser inserida no solo. As pontas porosas são confeccionadas em material cerâmico de alumina (Modelo 0604D04-B01M1, Soilmoisture Equipment Corporation, USA), moldadas com uma broca vazada de ponta diamantada (Glassvetro, São Paulo-SP).

Na Figura 6 estão mostrados os quinze (15) tensiômetros acoplados à parede de fundo do canal para monitorar o avanço da frente úmida, conectados ao sistema analógico computadorizado (PLC e controlador Modelo MCI02-QC, da HI Tecnologia Indústria e Comércio Ltda, São Paulo-SP) para aquisição de dados da sucção no solo e armazenamento periódico dos dados adquiridos pelo controlador.



Figura 6 - Vista da parede de fundo do canal com tensiômetros acoplados ao canal e ao sistema de aquisição de dados.

#### 4 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO EXPERIMENTO DE FLUXO

A modelagem matemática da infiltração cumulativa  $I(t)$  versus tempo, com base na posição da frente úmida,  $L(t)$ , medida na parte central do canal, foi feita utilizando o modelo da equação unidimensional de Philip (1969), com dois termos (Equação 1):

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3}Kt = L(t)(\theta_s - \theta_i) \quad [1]$$

Onde,  $S$  é a sorptividade, dada por:

$$S = \sqrt{2K(h_p - h_f)(\theta_s - \theta_i)} \quad [2]$$

Sendo  $K$ , o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica;  $h_p$ , a pressão hidrostática;  $h_f$ , a sucção na passagem da frente úmida;  $\theta_s$ , a umidade volumétrica saturada,  $\theta_i$ , a umidade volumétrica inicial, e  $L(t)$ , a posição da frente úmida no canal.

Foi também testada a modelagem matemática da infiltração cumulativa  $I(t)$  versus tempo, tomando-se a posição da frente úmida  $L(t)$ , na parte central do canal, e utilizando-se o modelo da equação unidimensional de Philip (1969), com três termos. Para isso, foi necessário definir o terceiro termo da série de potência deduzida por Philip (1969), aplicando os princípios de análise dimensional e similitude. O procedimento adotado vem descrito abaixo:

A série de potência de Philip (1969) que modela o crescimento total da umidade em uma região semi-infinita durante o intervalo de zero a  $t$ , escrita para a infiltração cumulativa é dada na forma:

$$I(t) = A_1t^{\frac{1}{2}} + A_2t + A_3t^{\frac{3}{2}} + A_4t^2 + \dots + A_n t^{\frac{n}{2}} \quad [3]$$

Sendo,

$$A_1 = S = \left(\frac{2}{1}\right)^{\frac{1}{2}} K^{\frac{1}{2}} (h_p - h_f)^{\frac{1}{2}} (\theta_s - \theta_i)^{\frac{1}{2}} \quad [4]$$

$$A_2 = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{2}{2}} K^{\frac{2}{2}} \quad [5]$$

Aplicando-se a análise dimensional e similitude, o terceiro termo foi deduzido neste trabalho, como:

$$A_3 = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{(h_p - h_f)^{\frac{1}{2}}} \quad [6]$$

Com esse parâmetro, a equação de infiltração com três termos é dada por:

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3}Kt + \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{(h_p - h_f)^{\frac{1}{2}}} t^{\frac{3}{2}} \quad [7]$$

## 5 - EXPERIMENTOS DE FLUXO BIDIMENSIONAL DE ÁGUA EM AREIA DE DUNA

Os experimentos de fluxo bidimensional da água em areia de duna foram realizados com o seguinte procedimento. Ao iniciar o experimento, abria-se a válvula de controle do sistema de fornecimento (Figura 4) para preenchimento do reservatório assentado no topo do solo. Em todos os casos, a infiltração iniciou-se após a água atingir o nível máximo no reservatório. O nível de água na base do canal foi estabelecido utilizando-se os tubos Mariotte nas laterais do canal.

O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros característicos dos experimentos de fluxo no canal, tais como: a massa total de areia utilizado no canal, a densidade aparente da areia compactada, o volume de água infiltrado e o tempo para frente úmida encontrar a franja capilar.

Quadro1 - Alguns parâmetros físicos para os ensaios com água em coluna de areia de duna compactada

Nº do Experimento	Altura de sedimento (cm)	Massa de solo (Kg)	Densidade aparente média (g.cm <sup>-3</sup> )	Volume de água infiltrado até atingir o topo da franja capilar (cm <sup>-3</sup> )	Tempo até frente úmida atingir o topo da franja capilar (s)
#01		636,9	1,720	8813,0	25,3
#02	115	657,7	1,690	8205,2	30,6
#05		626,4	1,712	9420,8	29,4

Durante os experimentos, os dados: nível do líquido no reservatório e valores de sucção intersticial, foram efetuados à cada 2 segundos, pelo sistema de aquisição e, apresentados em tempo real na tela do computador. As sucessivas posições da frente úmida no solo foram visualizadas e marcadas manualmente na parede de vidro na frente do canal, por dois operadores, enquanto era efetuado o registro manual do tempo. O experimento era filmado para registro e posterior ajuste das anotações.

Diversos parâmetros foram obtidos experimentalmente durante a execução do experimento no canal:  $L(t)$ ,  $(\theta_s - \theta_i)$ ,  $h_p = h_p(t)$ , e  $h_f$ . A posição da frente úmida no canal,  $L(t)$ , ou, profundidade da frente úmida, correspondeu às posições geométricas dos tensiômetros na direção vertical, bem como, as posições obtidas através do registro visual. A umidade volumétrica saturada,  $\theta_s$ , e a umidade volumétrica inicial  $\theta_i$ , foram consideradas dentro do termo  $(\theta_s - \theta_i)$  tomado como os valores da porosidade em cada coluna de areia. A medida da pressão hidrostática no topo da coluna foi assumida como os valores  $h_p = h_p(t)$  do líquido, no reservatório, admitindo-se a transmissão integral da pressão hidrostática para a superfície do solo. A sucção na frente úmida,  $h_f$ , correspondeu ao valor da sucção na passagem da frente, lido em cada um dos oito tensiômetros da posição central. Os tempos de infiltração corresponderam aos valores registrados computacionalmente durante as leituras da sucção por cada tensiômetro, bem como, durante o registro manual pelo operador, no momento da passagem da frente úmida. Esses resultados experimentais permitiram o cálculo do coeficiente de permeabilidade ( $K$ ), em cada posição do tensiômetro.

Ao final de cada ensaio foram coletadas alíquotas do solo, em diversos pontos da coluna, utilizando-se pequenos tubos de alumínio, de ponta biselada, com dimensões de 150 mm de comprimento por 6,35mm de diâmetro. As alíquotas foram pesadas, úmida e seca, e, os valores de umidade determinados por gravimetria. O valor da sucção foi registrado no momento de retirada do tensiômetro para coleta do solo de modo a permitir a montagem da curva de sucção versus umidade da coluna de areia e, comparação com os valores previamente obtidos em laboratório.

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 7 (a, b, c) mostram o registro das sucessivas posições das frentes úmidas para três experimentos de infiltração bidimensional de água em areia (Experimentos #01, #02, e #05).



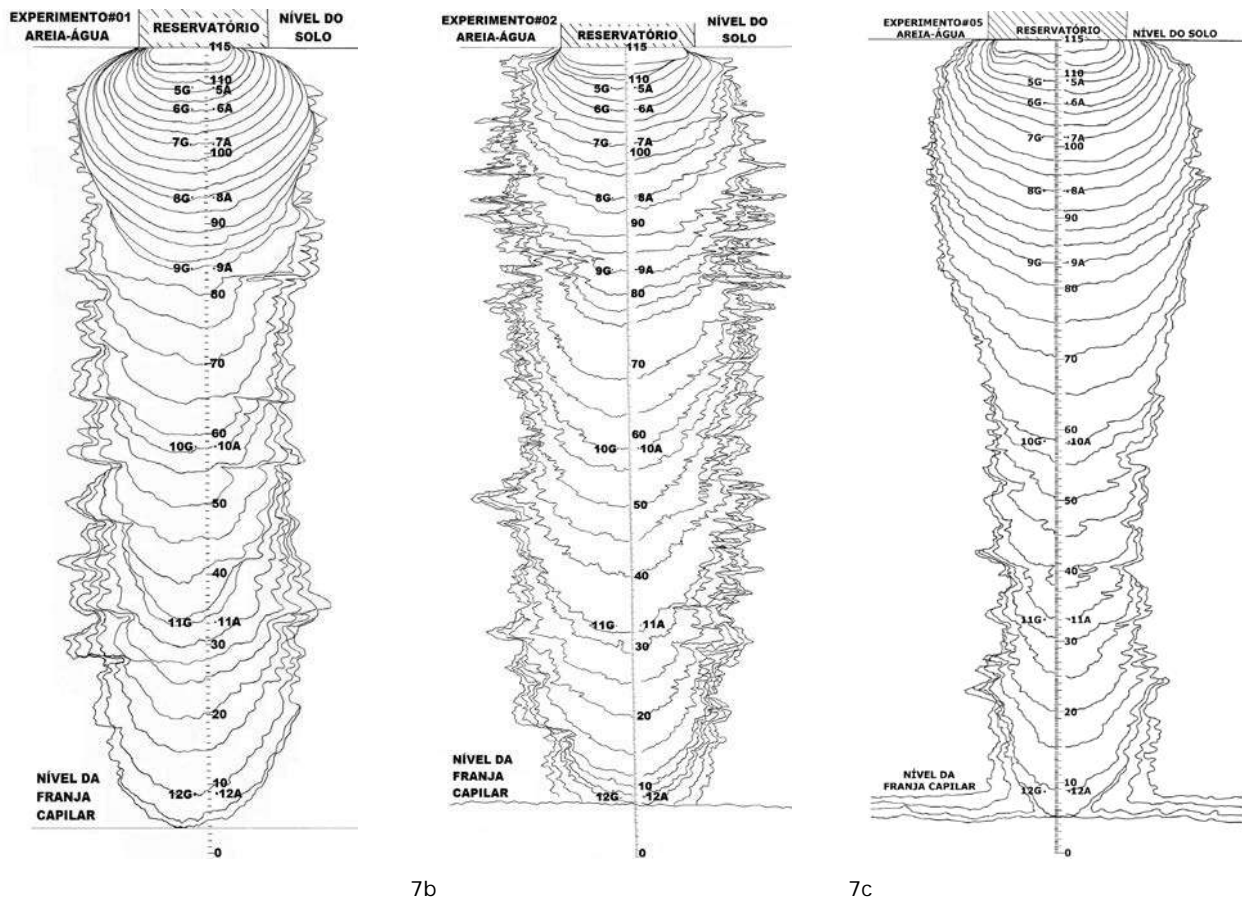


Figura 7 - Sequência das frentes úmidas da água na areia para os experimentos #01, #02, #05.

Nos três experimentos, os primeiros bulbos úmidos mostraram uma infiltração uniforme no topo do solo, com subseqüentes irregularidades no espalhamento lateral das frentes úmidas, devido a estratificação oriundas na compactação. Verifica-se também que o início da infiltração acontece na área subjacente à base do reservatório, evidenciando uma adequada conexão entre a base porosa do reservatório e o solo. Nos três experimentos, quando a frente úmida alcança a posição do tensiômetro 11A, o bulbo úmido mostra-se mais côncavo.

A Figura 8 mostra os gráficos da posição da frente úmida versus tempo para os experimentos #01, #02, e #05, para a infiltração bidimensional. Nas posições obtidas por visualização, as medidas são tomadas na linha central da pluma vertical. O experimento #01 apresenta um comportamento mais ascendente no final da curva, provavelmente associado à maior velocidade no fluxo verificada na posição do tensiômetro 11 (profundidade de 82 cm).

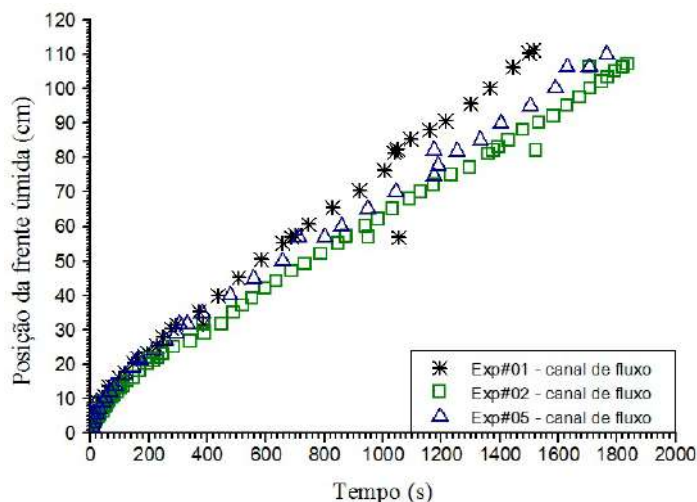


Figura 8 - Posição da frente úmida em função do tempo para os experimentos #01, #02, e #05. Dados experimentais obtidos na visualização e da leitura pelos tensiômetros.

Utilizando-se o software ORIGIN® 50 foi feito o ajuste matemático dos dados de infiltração (posição da frente úmida versus tempo) utilizando-se as equações de infiltração de Philip (1969) com 2 e 3-termos. Os resultados do ajuste estão dados nos quadros 2 e 3.

Quadro 2 - Simulação da posição da frente úmida utilizando equação de Philip 2-Termos

N° do Experimento	Equação de Philip 2-Termos cm	Parâmetros de ajuste			
		A cm.s <sup>-1/2</sup>	B cm.s <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup> (-)	
#01	$At^{\frac{1}{2}} + Bt$	0,9997	0,0465	0,999	
#02		0,7409	0,0401	0,999	
#05		1,0772	0,0348	0,999	
Parâmetros Estatísticos		Média	0,9394	0,0405	0,998
		Desvio Padrão	0,1761	0,0058	-
	Coeficiente de variação (%)	18,7	14,5	-	

Quadro 3 - Simulação da posição da frente úmida utilizando equação de Philip 3-Termos

N° do Experimento	Equação de Philip 3-Termos cm	Parâmetros de ajuste				
		A cm.s <sup>-1/2</sup>	B cm.s <sup>-1</sup>	C cm.s <sup>-3/2</sup>	R <sup>2</sup> (-)	
#01	$L = At^{\frac{1}{2}} + Bt + Ct^{\frac{3}{2}}$	1,3459	0,0170	0,00056	0,999	
#02		1,0493	0,0169	0,00039	0,999	
#05		1,3266	0,0142	0,00038	0,999	
Parâmetros Estatísticos		Média	1,2406	0,0160	0,00044	0,999
		Desvio Padrão	0,1659	0,0016	0,00010	-
	Coeficiente de variação (%)	13,4	9,9	22,8	-	

O Quadro 2 mostra, para os três experimentos, que os parâmetros de ajuste *A* e *B*, apresentam coeficientes de variação de 14,5 e 18,7%. Enquanto o Quadro 3 mostra que os parâmetros de ajuste *A*, *B* e *C* apresentam coeficientes de variação entre 9,9 e 22,8%, demonstrando a similaridade entre os experimentos. Vale lembrar que cada resultado refere-se a processos únicos, quanto ao resultado da compactação da areia no canal de fluxo, bem como, quanto à execução do procedimento de infiltração. Para ambos os modelos de Philip, 2-Termos e 3-Termos, os valores do coeficiente de correlação estão acima de 0,99, indicando forte correlação.

A Figura 9 apresenta, para o Experimento #01, os valores da sucção versus tempo, registrados pelos tensiômetros 5A, 6A, 7A e 8A, correspondentes às posições do 1° ao 4° tensiômetro, a partir do topo do solo, nas profundidades, em metro: 0,056; 0,090; 0,136; e 0,218, respectivamente.

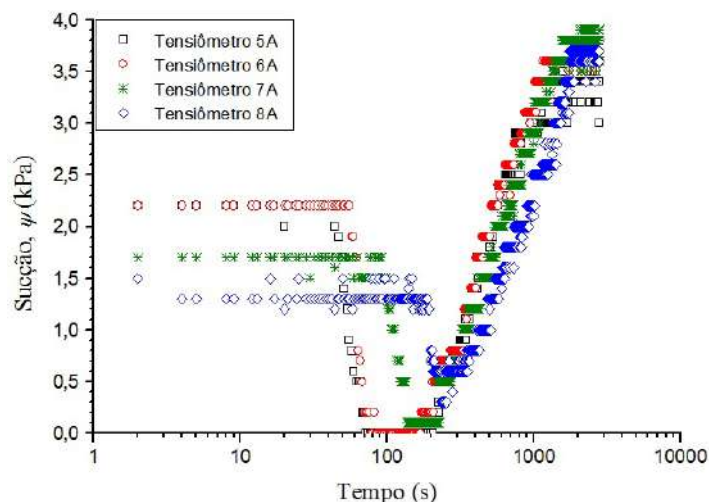


Figura 9 - Leitura dos tensiômetros 5A, 6A, 7A e 8A para o experimento #01

Observando os gráficos para os quatro primeiros tensiômetros, verifica-se que: i) os tensiômetros responderam à passagem da frente úmida no intervalo de 1 a 3 segundos; ii) a leitura dos tensiômetros somente se anula (100% de saturação) num tempo entre, 30 à 50 segundos; e, iii) após a passagem da frente úmida, num intervalo de 70 a 120 segundos, a sucção volta a aumentar gradualmente, indicando ter se iniciado o processo de drenagem, pelo fato do experimento ocorrer à carga variável.

A Figura 10 mostra o comportamento da umidade volumétrica em função da sucção, medida em nove tensiômetros, para os três experimentos no canal. Os valores da sucção foram lidos no momento em que



cada tensiômetro foi retirado e inseriu-se o coletor para obtenção da alíquota do solo, para medida da umidade por gravimetria.

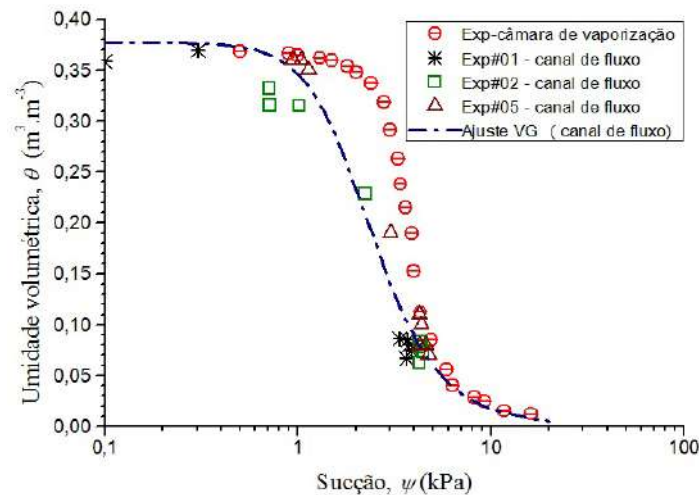


Figura 10 - Curvas de umidade-sucção de água em areia no regime estacionário de drenagem (câmara de vaporização); e regime transiente (no canal).

Na Figura 10, também é mostrada a curva de sucção (drenagem – regime estacionário) versus umidade volumétrica obtida com a câmara de vaporização, num sistema de fluxo bifásico água-ar na areia de duna. A câmara de vaporização foi desenvolvida segundo o modelo de Oliveira (1995), e o procedimento experimental é similar ao de Plagge *et al.* (1990), Wendroth *et al.* (1993), Tamari *et al.* (1993) e Oliveira (1995). No procedimento, o solo saturado com o líquido de interesse é aberto para atmosfera e, submetido à perda gradual de umidade. As medidas de sucção são efetuadas com um tensiômetro entre as etapas de vaporização. O ajuste matemático das curvas, para os parâmetros umidade volumétrica e sucção, foram obtidos com o modelo de Van Genuchten (1980), dado por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad [8]$$

Onde  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste, sendo  $m = 1/(n - 1)$ .

O Quadro 4 apresenta os parâmetros do ajuste matemático das curvas de sucção versus umidade volumétrica, com o modelo de van Genuchten (1980), Equação 8.

Quadro 4 - Parâmetros de ajuste van Genuchten da curva de retenção dos experimentos no canal de fluxo e na câmara de vaporização.

Experimento		Densidade aparente kg.m <sup>-3</sup>	Parâmetros van Genuchten			Umidade saturada, $\theta_s$ m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup>	Umidade residual, $\theta_r$ m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup>	R <sup>2</sup>
Equipamento	Nº		$\alpha$ kPa <sup>-1</sup>	$m$	$n$			
-	-							
Canal de fluxo	#01	1720	0,7984	0,5850	2,4120	0,3730	0,001	0,9870
	#02	1690	0,6813	0,6180	2,3580	0,3840	0,001	0,9612
	#05	1712	0,3931	0,7116	3,4675	0,3750	0,001	0,9930
	Ajuste incluindo todos os dados		0,5119	0,6590	2,9324	0,3774	0,001	0,9641
Câmara de vaporização	#01	1720	0,278	0,822	5,59	0,373	0,012	0,9960

Conforme mostrado na Figura 10, os dados de umidade-sucção obtidos no canal de fluxo, posicionando-se abaixo da curva de drenagem (regime estacionário), estão compatíveis com o processo de umedecimento da infiltração, ou do processo misto de umedecimento/drenagem que ocorre no regime transiente. Ou seja, essas curvas apresentam um provável comportamento de histerese. A diferença entre os comportamentos da drenagem e, do umedecimento, fica também evidenciada pelos valores das variáveis  $\alpha$ ,  $m$ , e  $n$  apresentados no Quadro 4.

Foram calculados os coeficientes de permeabilidade na posição de oito tensiômetros localizados na linha central da pluma vertical, para os três experimentos. Os gráficos da Figura 11 indicam que os valores de permeabilidade não são constantes, mas aumentam à medida que a frente úmida penetra no perfil, tendendo, assintoticamente para um valor máximo. A linha horizontal colocada no gráfico representa ao

valor do coeficiente de permeabilidade saturada, obtido para a areia de duna, sistema água-ar, em permeâmetro de parede rígida, valor de  $1,20 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

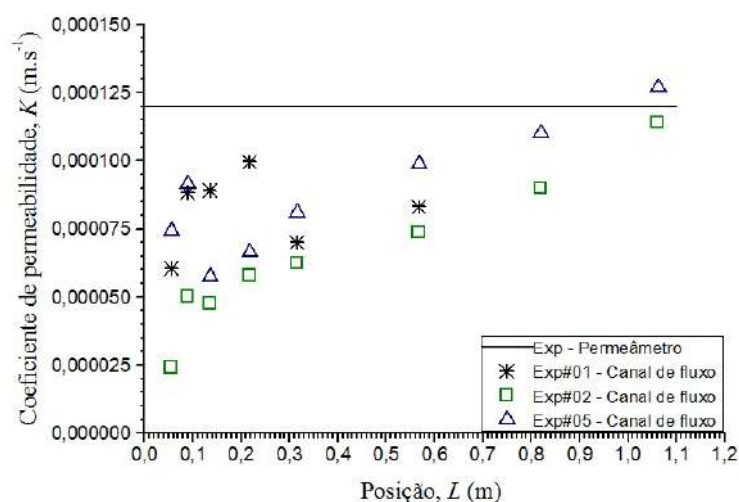


Figura 11 - Coeficiente de permeabilidade medido em cada posição dos tensiômetros.

O Quadro 5 apresenta a estatística descritiva dos valores do coeficiente de permeabilidade calculada nos três experimentos de fluxo, utilizando-se a equação de Philip 2-Termos, para a posição dos oito tensiômetros.

Quadro 5 - Estatística descritiva dos valores do coeficiente de permeabilidade obtidos nos experimentos de fluxo.

Nº do Experimento	Coeficiente de permeabilidade				Desvio padrão cm.s <sup>-1</sup>	CV Final %
	Média cm.s <sup>-1</sup>	Mediana cm.s <sup>-1</sup>	Menor Valor cm.s <sup>-1</sup>	Maior Valor cm.s <sup>-1</sup>		
#01	8,18E-05	8,58E-05	6,04E-05	9,96E-05	1,42E-05	17,3
#02	6,49E-05	6,00E-05	2,41E-05	1,14E-04	2,76E-05	42,5
#05	8,83E-05	8,61E-05	5,76E-05	1,27E-04	2,31E-05	26,2

O coeficiente de variação (CV) dos valores médios do coeficiente de permeabilidade, nos três experimentos, entre 17,3 e 42,5%, ou seja, com valores significativos para CV, indica que o processo de infiltração alimentado por reservatório com carga hidráulica variável, ocorre de forma transiente no meio poroso, em regime de não saturação.

## 7 - SIMULAÇÃO DOS RESULTADOS

Em situações que envolvem o vazamento de líquidos orgânicos para o solo e água subterrânea, uma solução expedita, adotada por gestores de meio ambiente, depende do uso de um conjunto de parâmetros de transporte obtidos previamente em laboratório ou campo, relativos ao local do solo contaminado. Dentre os parâmetros estão: sucção versus umidade, coeficiente de permeabilidade, porosidade e profundidade do lençol freático; bem como as características do líquido de interesse. A partir disso, é possível prever os resultados em campo, da infiltração dos líquidos contaminantes, relativo ao tempo para atingir a água subterrânea.

Como teste, foi feita uma simulação do processo de infiltração no canal, utilizando-se os seguintes dados: i) a curva de retenção (drenagem), obtida na câmara de vaporização, admitindo-se que a pressão de entrada do líquido no solo (umedecimento) corresponde à metade do valor da pressão de entrada de ar (drenagem) conforme Bouwer (1966); ii) o coeficiente de permeabilidade obtido no permeâmetro de parede rígida ( $1,2 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ); iii) a porosidade do solo compactado no canal; iv) o nível da franja capilar no canal; e v) o valor de altura máxima de líquido no reservatório, admitindo-se que esta é a única informação disponível para o gestor de meio ambiente.

Foi feita a simulação utilizando-se as equações de infiltração de Philip 2-Termos e 3-Termos, para prever o tempo para que a frente úmida alcance o topo da franja capilar. Os quadros 6 e 7 apresentam esses resultados.

Quadro 6 - Cálculo do tempo para atingir a franja capilar utilizando dados experimentais em permeâmetro, câmara de vaporização e dados do canal e simulação com Philip 2-Termos.

Nº do experimento	Dados em câmara de vaporização e permeâmetro		Dados em canal de fluxo			Tempo para encontrar a franja		
	$h_f = \frac{1}{2}P_b$	$K_{sat}$	$\theta_s - \theta_r$	$L_{frente/franja}$	$h_p(t)$	Experimental $t_{exp}$	Previsão $t_{prev}$	$\Delta t = 100 * \left( \frac{t_{exp} - t_{prev}}{t_{exp}} \right)$
	cm	cm.s <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>	cm	cm	s	s	%
#01	16,32	0,012	0,3724	111,2	46,87	1515,53	1517,30	-0,12
#02	16,32	0,012	0,3827	107,0	48,91	1837,20	1443,15	21,5
#05	16,32	0,012	0,3741	109,8	48,91	1765,28	1468,62	16,8

Quadro 7 - Cálculo do tempo para atingir a franja capilar utilizando dados experimentais em permeâmetro, câmara de vaporização e dados do canal e simulação com Philip 3-Termos.

Nº do experimento	Dados em câmara de vaporização e permeâmetro		Dados em canal de fluxo			Tempo para encontrar a franja		
	$h_f = \frac{1}{2}P_b$	$K_{sat}$	$\theta_s - \theta_r$	$L_{frente/franja}$	$h_p(t)$	Experimental $t_{exp}$	Previsão $t_{prev}$	$\Delta t = 100 * \left( \frac{t_{exp} - t_{prev}}{t_{exp}} \right)$
	cm	cm.s <sup>-1</sup>	cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>	cm	cm	s	s	%
#01	16,32	0,012	0,3724	111,2	46,87	1515,53	1214	19,90
#02	16,32	0,012	0,3827	107,0	48,91	1837,20	1334	27,39
#05	16,32	0,012	0,3741	109,8	48,91	1765,28	1356	32,64

Os resultados demonstram uma significativa habilidade (0,12 – 21,5%) para a equação de 2-Termos, prever o tempo para o encontro da frente úmida com a franja capilar no canal de fluxo, resultado melhor que os obtidos com a equação de 3-Termos.

## 8 - CONCLUSÃO

Os testes efetuados no canal de fluxo instrumentalizado com a infiltração bidimensional da água em areia não saturada, comprovaram os seguintes aspectos:

Quanto ao aparato: (i) a capacidade dos tensiômetros medirem a sucção atuante na frente líquida, com tempo de resposta de 1 a 3s com relação ao momento da aproximação da frente; (ii) a funcionalidade do reservatório de fundo poroso representando o vazamento de tanques de armazenamento de combustíveis em refinaria e sua conexão hidráulica com o solo, permitindo a medida dos valores de  $h_p = h_p(t)$ ; (iii) a possibilidade de monitoramento visual, no tempo e no espaço, da frente líquida; e (iv) a possibilidade de obtenção dos parâmetros de fluxo, sucção e condutividade hidráulica, necessários para a modelagem matemática do fenômeno.

Quanto aos resultados obtidos, verificou-se: (i) a habilidade da equação de Philip 2-Termos modelar matematicamente as curvas de infiltração (coeficiente de correlação acima de 0,99); e (ii) a habilidade dos dados experimentais (sucção e coeficiente de permeabilidade), obtidos fora do canal de fluxo, prever o tempo que a frente úmida leva para alcançar a franja capilar, durante o experimento no canal, com discrepância de 0,12 a 21,5%, utilizando-se a equação clássica de infiltração de Philip (1969) com 2-Termos.

## REFERÊNCIAS

- Abriola, L. M. (1989). Modeling multiphase migration of organic chemicals in groundwater systems: A review and assessment. *Environmental Health Perspectives* vol. 83, pp. 117-143.
- Abriola, L. M. e Pinder, G. F. (1985). A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds: I. Equation development. *Water Resource Research*, vol. 21:1, pp. 11-18.
- Bond, W. J. e Collins-George, N. (1981). Ponded infiltration into simple soil systems, 1 The saturation and transition zones in the moisture content file. *Soil Science*, vol. 131:4, pp. 202-209.

- Bouwer, H. (1966). Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water Resources Research*, vol. 2, pp. 729-738, doi:10.1029/WR002i004p00729
- Butts, M. B. e Jensen, K. H. (1996). Effective for multiphase flow in layered soils. *Journal of Hydrology*, vol. 183, pp. 101-116.
- Host-Madsen, J. e Jensen, K. H. (1992). Laboratory and numerical investigation of immiscible multiphase flow in soil. *Journal of Hydrology*, vol. 135, pp. 13-52, doi: 10.1016/0022-1694(92)90079-B.
- Kamaruddin, S. A.; Sulaiman, W. N A.; Rahman, N. A.; Zakaria, M. P.; Mustaffar, M. e Sa'ari, R. (2011) *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 4:3, pp. 191-214.
- Kamon, M.; Endo, K.; Kawabata, J.; Inui, T. e Katsumi, T. (2004). Two dimensional DNAPL migration affected by groundwater flow in unconfined aquifer. *Journal of Contamination Hydrology*, vol. 110, pp. 1-12.
- Kechavarzi, C.; Soga, K. e Illangasekare, T. H. (2005). Two dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contamination Hydrology*, vol. 76, pp. 211-233.
- Kechavarzi, C.; Soga, K.; Illangasekare, T. H.; e Nicolopoulos, P. (2008). Laboratory study of immiscible contamination flow in unsaturated layered sand. *Vadose Zone Journal*, vol. 7, pp. 1-9.
- Kechavarzi, C.; Soga, K. e Wirt, P. (2000). Multispectral image analysis method to determine dynamic fluid saturation distribution in two dimensional three fluid phase flow laboratory experiment. *Journal of Contamination Hydrology*, vol. 46, pp. 265-293.
- Klute, A. (1986). Methods of soil analysis, parte 1; physical and mineralogical methods, 2nd ed., *Amer. Soc. Agronomy, Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, Wisconsin, 1173 p.
- Kueper, B. H.; Abbott, W. e Farquhar, G. (1989). Experimental observations of multiphase flow in heterogeneous porous media. *Journal of Contamination Hydrology*, vol. 5, pp. 83-95.
- Mcdowell, C. J. e Powers, S. (2003). Mechanisms affecting the infiltration and distribution of ethanol-blended gasoline in the vadose zone. *Environmental Science e Technology*, vol. 37:9, pp. 1803-1810.
- Oliveira, I. B. (1995). Infiltration of organic liquids in unsaturated sands: comparison of experimental measurements with scaled and unscaled analytical solutions. Doctoral Thesis in Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 335 p.
- Oostrom, M.; Dane, J. H.; e Wietsma, T. W. (2007) A review multidimensional multifluid intermediate scaling experiment: Flow behavior, saturation imaging and trace detection and quantification. *Vadose Zone Journal* vol. 6, pp. 610-637.
- Phillip, J. R. (1969). Theory of Infiltration. *Advances in Hydroscience*, vol. 5, pp. 215-1296.
- Plagge, R.; Renger, M. e Roch, C. H. (1990) A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures. *Z. Pflanzenernahr, Bodenkd*, vol. 153, pp. 39-45.
- Schiegg, H. O. (1990). Laboratory setup and results of experiments on two-dimensional multiphase flow in porous media. English translation by J. F. McBride e D. N. Graham (Editors), Pacific Northwest Laboratory, October, 1990, Springfield, VA, prepared for U. S. Dep. Of Energy, Washington, D. C., DE-AC06-76RLO1830, 423p.
- Schroth, M. R.; Istok, J.D.; Selker, J. S.; Oostrom, M. e White, M. D. (1998). Multifluid flow in bedded porous media: laboratory experiments and numerical simulations. *Advances in Water Resources*, vol. 22, pp. 169-183.
- Silliman, S. E.; Berkowitz, B.; Simunek, J. e van Genuchten, M. T. (2002). Fluid flow and solute migration within the capillary fringe. *Ground Water*, vol. 40, pp. 76-84.
- Sousa, R. P., Oliveira, I. B., e Machado, S. L. (2011). The use of hydrophobic and hydrophilic tensiometers in the measurement of water and NAPL suctions and determination of SLRC. *Soils e Rocks*, São Paulo, vol. 34, September-December (in press).
- Tamari, S.; Bruckler, L.; Halbertsma, J. e Chadoeuf, J. (1993). A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am J.*, vol. 57, pp. 642-651.
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed form equations for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, pp. 892-898.
- Wendroth, O.; Ethlers, J.; Hopmans, J.W.; Kage, H.; Halbertsma, J.; e Wosten, J.H.M. (1993) Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 57, pp. 1436-1443.