

## Ensaio de Deslocamento de Líquido Miscível na Determinação dos Parâmetros Hidrodispersivos de um Solo Aluvial

Celme Tôrres Costa

Depto. de Eng. Hidráulica e Ambiental/CT/UFC  
celmeanp@ufc.br

Antonio Celso Dantas Antonino; André Maciel Netto

Depto. de Energia Nuclear/CTG/UFPE  
acda@ufpe.br, amnetto@ufpe.br

Recebido: 20/08/02 – revisado: 26/10/04 – aceito: 06/06/06

---

### RESUMO

Ensaio de deslocamento de líquido miscível em colunas de solo em laboratório foram utilizados na caracterização hidrodispersiva de três amostras de solo com diferentes classes texturais: areia franca, franco argilo arenosa e arenosa, de um solo Aluvial das margens do Açude Cajueiro no semi-árido do Brasil. Os ensaios compreendem o deslocamento de um pulso de 1/2 volume de poros da solução de  $\text{CaCl}_2$  a 0,01 M em colunas de solo sob condições de saturação e fluxo em regime estacionário. Os parâmetros hidrodispersivos foram obtidos utilizando o ajuste da solução analítica da equação da convecção-dispersão, CDE ( $v, D$ ) e da equação da convecção-dispersão a duas frações de água, CDE-MIM ( $v, D, e$ ) aos pontos da curva de eluição experimental, utilizando o programa CXTFIT 2.0.

**Palavras-chave:** deslocamento miscível, dispersividade, curva de eluição.

---

### INTRODUÇÃO

A caracterização dos parâmetros hidrodispersivos de um solo é de fundamental importância para a utilização de modelos de simulação numérica dos processos de transferência de soluto visando melhorar o manejo e aplicação de substâncias químicas no solo, minimizando assim os riscos de salinização e poluição dos lençóis freáticos.

Os parâmetros hidrodispersivos possuem uma importância significativa na caracterização do movimento de solutos no solo. Uma variedade de métodos existe para a determinação desses parâmetros, tais como: método de otimização não-linear dos mínimos quadrados (Parker & van Genuchten, 1984); função de transferência lognormal – TFM função de transferência lognormal – TFM (Jury e Sposito, 1985) e o Método dos Momentos (Feike e Dane, 1992). Todos se baseiam no ajuste da solução analítica da equação da convecção-dispersão (CDE) aos pontos da curva de eluição obtida em ensaios de deslocamento de líquidos miscíveis (Gaudet et al., 1977). Por outro lado, soluções analíticas da equação da convecção-dispersão (CDE) têm sido derivadas para uma variedade de condições de

contorno (van Genuchten & Alves, 1982; Ségol, 1993; Leij & Toride, 1995). Embora essas soluções analíticas sejam obtidas para condições restritas, elas têm muitas aplicações tais como: prognóstico do transporte de soluto a longo termo (tempo ou distância), análise de sensibilidade do transporte de solutos, e a determinação dos parâmetros hidrodispersivos para estudo em colunas de solo em laboratório ou lisímetro, descrevendo com relativa simplicidade o comportamento de um determinado soluto dentro do solo.

Desde os trabalhos iniciais em transporte de solutos no solo, no início da década de sessenta (Nielsen & Biggar, 1961; Biggar & Nielsen, 1962), o número de trabalhos tem crescido consideravelmente, e com eles o número de situações experimentais e circunstâncias sobre as quais a equação de convecção-dispersão (CDE) é aplicada. A literatura nacional cita alguns estudos envolvendo transporte de solutos e outras substâncias químicas em condições de laboratório (Cunha et al., 1996; Schindwein, 1998; Oliveira et al., 1999) e de campo (Nascimento Filho et al., 1979). No entanto, poucos trabalhos existem no que se refere a solos do semi-árido do Nordeste do Brasil (Leite & Skogley, 1977).

Este estudo se enquadra no Projeto Açudes (Valorização dos Recursos Aquáticos em Açudes do semi-árido de Pernambuco, convênio CNPq-UFRPE-UFPE/IRD - França), que possibilitou, no seu segmento de pesquisa relativo ao uso agrícola da água dos açudes, o estudo da dinâmica hidro-salina do sistema de cultivo de vazante tendo como objetivo a determinação experimental dos parâmetros hidrodispersivos de um solo aluvial do semi-árido do Nordeste do Brasil, utilizando o ajuste da solução analítica da equação de convecção-dispersão (CDE) e da equação de convecção-dispersão a duas regiões de água (CDE-MIM) aos pontos da curva de eluição obtida em ensaios de deslocamento miscíveis em colunas de solo em laboratório.

## TEORIA

Estudos experimentais de transferência de água e de solutos no solo têm sido desenvolvidos na tentativa de melhorar o manejo e aplicação de água e substâncias químicas em solos e culturas, e para prognosticar o destino dessas substâncias no meio ambiente. O maior parte desses estudos é realizado com a finalidade de proporcionar um melhor entendimento sobre a complexidade dos diversos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem dentro do solo e têm conduzido ao desenvolvimento de um grande número de modelos matemáticos, os quais variam amplamente em suas aproximações e grau de sofisticação, e são fortemente influenciados pelo sistema em estudo.

Os solutos são transportados no solo pelo movimento da água ou por fluxo de massa. Nesse movimento, partes desses solutos poderão ser adsorvidos pelo solo ou pelas plantas, ou mesmo ser precipitado quando sua concentração exceder sua solubilidade, como acontece na superfície do solo durante a evaporação. Por outro lado, os solutos não se movem somente com a água no solo; eles também se dispersam na mesma, em resposta aos gradientes de concentração, como também reagem entre si e interagem com a matriz do solo numa sucessão cíclica de processos físicos e químicos inter-relacionados. Essas interações são geralmente influenciadas por uma série de fatores: acidez, temperatura, potencial de óxido-redução, composição e concentração da solução do solo. Dessa forma, os processos de acumulação e transporte de sais no solo e através dele dependem da natureza de ambos, sais e solo. Três processos controlam o deslocamento de solutos e/ou substâncias químicas: a convec-

ção ou advecção, onde as partículas de soluto são transportadas pelo escoamento da água, este fenômeno é controlado pelas características hidrodinâmicas do meio poroso; a difusão molecular que ocorre nas fases gasosa e líquida, devido ao movimento térmico ocasionado pelas colisões das moléculas no fluido e ao gradiente de concentração, o qual provoca um fenômeno de difusão, sob efeito do movimento Browniano, que tende a homogeneizar a concentração; e a dispersão hidrodinâmica resultante da não uniformidade microscópica da velocidade da água nos poros condutores do solo.

No transporte de contaminantes no meio poroso existe uma mistura mecânica (dispersão) decorrente tanto da dispersão em poros individuais, como também do desenvolvimento de velocidades médias diferentes nestes poros, devido à variação das dimensões dos poros ao longo das linhas de fluxo e do desvio da trajetória das partículas devido à tortuosidade, reentrâncias e interligações entre os poros (Bear, 1972). A dispersão que ocorre na direção do fluxo é chamada dispersão longitudinal e a que ocorre na direção perpendicular ao fluxo é chamada dispersão transversal.

As variáveis que interferem nos mecanismos de transferências são: a porosidade e a umidade do solo, como também as propriedades físico-químicas dos constituintes do solo, mais particularmente as propriedades de adsorção, a presença de matéria orgânica, as interações biológicas, as propriedades físico-químicas dos compostos e as práticas culturais.

O fenômeno de deslocamento de líquidos miscíveis representado pelas curvas de eluição é altamente relevante para soluções de problemas reais tais como: a lixiviação do excesso de sais em solos salinos, à aplicação de fertilizantes e pesticidas, e a possível poluição dos lençóis freáticos – sujeitos a solutos de vários tipos, incluindo lixo radioativo e substâncias químicas tóxicas.

## FORMULAÇÃO NUMÉRICA

Existe atualmente um interesse substancial na utilização de modelos para conduzir a aplicação de água e substâncias químicas em solos e culturas, e para prognosticar o destino dessas substâncias no meio ambiente. Quando os modelos consideram as variáveis de entrada e/ou os parâmetros dependentes de funções aleatórias esses modelos são definidos como modelos estocásticos, do contrário os modelos são determinísticos. Os modelos conceituais correspondem a uma função baseada sobre conhecimen-

tos reais dos processos implicados, porém, se essa função é baseada em resultados experimentais, esses modelos são ditos empíricos. O transporte de solutos em um meio poroso pode ser conceitualizado mediante os modelos convecção-dispersão (CDE) e convecção-dispersão a duas regiões de água móvel e imóvel (CDE-MIM) (Coast & Smith, 1964). Os modelos CDE e CDE-MIM são modelos conceituais que podem ser aplicados como determinísticos ou estocásticos.

### Modelo Convecção-dispersão(CDE)

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ -D \frac{\partial(\theta C)}{\partial z} + v\theta C \right] \quad (1)$$

onde  $D [L^2.T^{-1}]$  é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica do soluto no meio poroso, e  $v [L.T^{-1}]$  é a velocidade média do transporte de solutos ou velocidade média da água nos poros, dada por:

$$v = \frac{q}{\theta} \quad (2)$$

Fried e Combarous (1971) constataram que, para um certo valor da velocidade de escoamento, o coeficiente de dispersão ( $D$ ) aumenta de uma forma praticamente linear, sendo o fator de proporcionalidade denominado de dispersividade ( $\lambda$ ), fator este dependente das características do meio poroso. Ele varia com o teor de água ( $\theta$ ) e com a profundidade em um solo heterogêneo (Biggar & Nielsen, 1976). Roth (1996) mostrou que a dispersividade é representativa da distribuição de soluto no solo e depende fortemente da estratificação do solo e do regime de escoamento transitório. É importante notar que, no momento em que se considera a difusão molecular desprezível diante da dispersão hidrodinâmica, a variação de  $D$  se torna linear com a velocidade média de água nos poros ( $v$ ). Dessa forma pode-se escrever:

$$D = \lambda v \quad (3)$$

Fisicamente, a dispersividade ( $\lambda$ ) é definida como o comprimento característico do transporte de solutos em um meio poroso.

Gelhar et al. (1992) compilaram uma série de 59 resultados de dispersividade em laboratório e

em campo, e projetaram a relação entre dispersividade e a escala de trabalho. Os resultados confirmaram a tendência de crescimento da dispersividade com a escala. Os resultados obtidos em laboratório indicaram valores de dispersividade variando entre  $10^{-4}m$  e  $10^{-1}m$  para solos homogêneos de granulometria fina, e cerca de  $1m$  para areia grossa, enquanto ensaios de traçadores no campo apresentaram valores de dispersividade variando entre  $10^{-2}m$  e  $10^2m$ .

### Modelo Convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM)

$$\frac{\partial\theta_m C_m}{\partial t} + \frac{\partial\theta_{im} C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial\theta_m C_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\theta_m v_m C_m) \quad (4)$$

Coast e Smith (1964) propuseram uma relação que descreve a troca de massa de solutos entre as duas regiões de água móvel e imóvel, dada por uma cinética de primeira ordem:

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (5)$$

onde  $\alpha [T^{-1}]$  é o coeficiente de transferência de massa entre as duas frações de água.

As grandezas normalmente utilizadas nos problemas de transporte são descritas a partir do comprimento característico  $L$ , do fluxo de água  $q$ , da dispersão hidrodinâmica  $D$  e das umidades  $\theta$  e  $\theta_m$ . Pode-se assim definir:

A fração de água móvel ( $f$ ) é um fator que relaciona o teor de água móvel  $\theta_m$  ao teor total de água  $\theta$ , dado por:

$$f = \frac{\theta_m}{\theta} \quad (6)$$

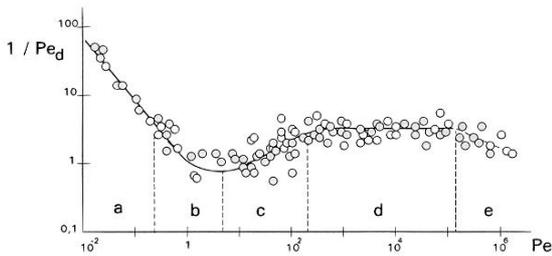
A variável de maior influência sobre o valor de  $f$  é o teor total de água. Quanto mais o solo se aproxima da saturação, maior a porção de água que participará do escoamento. Neste caso, o fator  $f$  tende a 1,0 quando a umidade se aproxima do valor de saturação (Gaudet et al., 1977). Outras variáveis, tais como a velocidade da água no poros, a concentração do soluto aplicado e as características físicas do solo, como estrutura e textura, também influenciam no valor de  $f$ , porém em menor escala.

O número de Péclet ( $Pe$ ) é um parâmetro adimensional utilizado para determinar qual mecanismo (convecção-dispersão ou difusão) domina o

processo de transferência de solutos (Roth, 1996). Em nível macroscópico o número de Péclet é dado por:

$$Pe = \frac{vL}{D} \quad (7)$$

onde L é o comprimento característico da coluna de solo, D é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica [ $L^2T^{-1}$ ] e v é a velocidade da água nos poros [ $LT^{-1}$ ]. Na Figura 1 observa-se que, a partir de certo valor da velocidade de escoamento ( $Pe > 1$ ) o logaritmo da relação aumenta de modo praticamente linear com o logaritmo do número de Peclet (Novy Quadry, 1993).



**Figura 1 – Diferentes regimes de um deslocamento miscível (Novy-Quadry, 1993).**

O regime de dispersão mecânica para o domínio da lei de Darcy é observado no trecho (c). Nesta zona o efeito da inércia não é desprezível, e a turbulência pode intervir acentuando os efeitos da dispersão transversal. Desta forma, o transporte pode ser classificado em função do número de Péclet. Para valores de  $Pe > 10$  o transporte é predominantemente convectivo e para  $Pe < 10$  o transporte é considerado difusivo.

O número de Damkohler ( $\omega$ ) está associado ao coeficiente de transferência de massa; ele mostra a importância dos fenômenos de transferência com relação à convecção, sobre uma distância L, sendo escrito como:

$$\omega = \frac{\alpha L}{q} \quad (8)$$

Devido à complexidade dos processos de transferência de solutos, algumas hipóteses são necessárias a fim de simplificar os mecanismos envolvidos, tornando possível a solução da equação do transporte no meio poroso. As hipóteses utilizadas neste trabalho são: a matriz sólida é indeformável;

homogênea e isotrópica na escala macroscópica; o escoamento é unidirecional (vertical); a taxa de fluxo é constante; o soluto (sal) é miscível com o solvente (água); o escoamento é isotérmico; a fase líquida é suposta contínua, umidade constante à saturação em água; as variações de massa e da viscosidade da solução em função da concentração do soluto são desprezíveis; a matriz sólida é inerte, não existindo interações químicas entre a fase líquida e a fase sólida (solute não-reativo).

Essas hipóteses são evidentemente restritivas quanto à generalidade do problema, mas elas permitem uma aproximação satisfatória relacionada ao processo de transferência hidrodinâmica e hidrodispersiva, fornecendo informações necessárias e significativas à análise e compreensão das transferências de água e solutos, em um meio saturado, e à caracterização hidrodispersiva do solo em estudo.

### SOLUÇÕES ANALÍTICAS

As soluções analíticas da equação convecção-dispersão (CDE) e equação da convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM) têm sido derivadas para uma variedade de condições de contornos (van Genuchten & Alves, 1982, Ségol, 1993; Leij & Toride, 1995). Embora as soluções analíticas sejam obtidas para condições restritas, elas têm muitas aplicações, tais como a validação de programas computacionais, prognóstico do transporte de soluto a longo termo (tempo ou distância), a análise de sensibilidade do transporte de solutos e a determinação dos parâmetros hidrodispersivos em experimentos sob condições controladas em colunas de solo ou lisímetros. Apesar de simples, as soluções analíticas necessitam de cuidadosa atenção no que se refere às condições de contorno que são empregadas na análise matemática do problema físico (Parker & van Genuchten, 1984; Toride et al., 1993).

As condições inicial e de contorno para um pulso e injeção contínua de solução deslocadora, empregando a concentração de fluxo ( $C_f$ ) na entrada e saída de uma coluna de solo são as mesmas para os modelos CDE e CDE-MIM.

- Condição inicial:

$$C_f(z,0) = 0 \quad (9)$$

- Condição de contorno inferior:

$$\frac{\partial C_f}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (10)$$

- Condição de contorno superior:

$$C_f(0, t) = \begin{cases} C_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (11)$$

onde  $C_0$  é a concentração do soluto na solução deslocadora ( $ML^{-3}$ ),  $t$  é o tempo (T) e  $t_0$  é o tempo de aplicação da solução deslocadora [T].

A solução analítica da equação CDE utilizando as condições inicial e de contornos acima consideradas são dadas por (van Genuchten & Wierenga, 1986):

$$C_f(z, t) = \begin{cases} C_0 B(z, t) & 0 < t < t_0 \\ C_0 B(z, t) - C_0 B(z, t - t_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (12)$$

sendo:

$$B(z, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{z - vt}{2(Dt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{vz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{z + vt}{2(Dt)^{1/2}} \right] \quad (13)$$

Soluções analíticas similares ao modelo de equilíbrio (CDE) podem ser formuladas também para o modelo de não-equilíbrio físico (CDE-MIM). As soluções analíticas para as condições inicial e de contorno anteriormente consideradas são dadas por (Toride et al., 1993):

$$C_f(z, t) = \begin{cases} C_0 B(z, t) & 0 < t < t_0 \\ C_0 B(z, t) - C_0 B(z, t - t_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$B(z, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\beta z - vt}{2(\beta Dt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{vz}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{\beta z + vt}{2(\beta Dt)^{1/2}} \right] \quad (15)$$

onde:

$\operatorname{erfc}$  a função erro e  $\beta$  é o coeficiente de partição entre as duas frações de água móvel e imóvel, dado por:

$$\beta = \frac{\theta_m + f \rho_b K_d}{\theta + \rho_b K_d} \quad (16)$$

onde,  $\rho_b$  é a massa específica do solo seco [ $ML^{-3}$ ],  $\theta_m$  é a umidade volumétrica do solo na fase móvel [ $L^3L^{-3}$ ] e  $K_d$  é o coeficiente de distribuição de solutos entre a fase líquida e a fase adsorvida [ $L^3M^{-1}$ ]. No caso de solutos não-reativos, o coeficiente de distribuição  $K_d$  é igual a zero, sendo  $\beta$  um parâmetro adimensional característico dos modelos de não-equilíbrio. Note-se que, para o caso de solutos não-reativos,  $\beta$  é igual à fração de água móvel ( $f = \theta_m / \theta$ ).

## MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo experimental adotado neste estudo torna possível caracterizar os processos de transferência de água e de solutos pela análise detalhada das curvas de eluição experimentais.

Para quantificar os parâmetros hidrodispersivos, colunas de solo em laboratório foram utilizadas sob regime de escoamento permanente. O estudo foi conduzido no Laboratório de Caracterização Hidrodispersiva, Grupo de Física de Solos, do Departamento de Energia Nuclear - DEN/UFPE. Neste estudo foram considerados apenas os processos físicos envolvidos nas transferências de água e de solutos.

As amostras de solo utilizadas foram coletadas próximo aos sítios experimentais, destinados ao estudo da dinâmica hidro-salina do sistema de cultivo de vazante, instalados na vazante do Açude Cajueiro localizado no município de Tuparetama (Latitude (S) 7°36'0" e Longitude (W.Gr.) 37°18'45") no Estado de Pernambuco, a 385 km da capital do Estado. Foram selecionadas três amostras deformadas de solo com as seguintes características: areia franca com 15,4% de argila, 8,7% de silte e 72,9% de areia; franco argilo-arenosa com 22,5% de argila, 17,4% de silte e 56,2% de areia; arenosa com 2,8% de argila, 1,5% de silte e 95,4% de areia. Nos ensaios foram utilizadas amostras perturbadas, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira para obtenção de agregados de diâmetro menor que 2,0 mm. O acondicionamento das amostras de solo nas colunas foi feito em camadas de aproximadamente 2 cm levemente compactadas, com massa específica aparente próxima àquela obtida em condições naturais de campo.

Os valores da umidade e do fluxo foram determinados experimentalmente, e o único valor variável no tempo foi a concentração do soluto. No dispositivo experimental foram utilizadas colunas

em PVC cilíndricas com 4,5 cm de diâmetro interno e 40 cm de altura. As bases das colunas foram confeccionadas em PVC, possuindo internamente anéis de borracha para garantir uma perfeita vedação do sistema. Interiormente a essas bases, colocou-se uma chapa de acrílico de 3,0 mm de espessura perfurada e uma tela de "nylon" para impedir a perda do solo durante a realização do ensaio. As colunas de solo foram submetidas a gradientes hidráulicos de 0,085 m/m para a coluna de solo areia franca, e de 0,145 m/m e 0,144 m/m para as colunas de solo franco-argilo arenosa e arenosa, respectivamente. A Figura 02 ilustra o dispositivo experimental.

A alimentação da coluna de solo com a solução deslocadora foi efetuada utilizando-se uma bomba peristáltica conectada a base superior da coluna, sendo os efluentes da solução recolhidos na base inferior e coletados em frações no tempo através de um coletor de frações. A determinação da concentração na solução efluente foi obtida a partir das leituras do condutivímetro.

O processo de saturação das colunas de solo foi realizado antes das mesmas serem fechadas. As colunas de solo foram lentamente saturadas com água sob fluxo ascendente. O tempo de saturação foi de 24 horas para a coluna de solo arenoso e de 72 horas para as colunas de solo franco arenoso e franco argilo arenoso. As colunas foram submetidas a um processo de lixiviação com água deionizada de condutividade elétrica  $CE = 2\mu S.cm^{-1}$ . O processo teve a finalidade de eliminar os sais eventualmente presentes no solo. Uma quantidade de água deionizada equivalente a 5 vezes o volume de poros da coluna foi utilizada nesse processo.

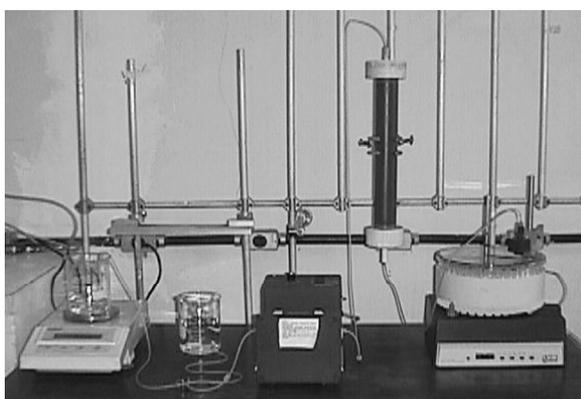


Figura 02 - Dispositivo experimental utilizado em deslocamento de líquidos miscíveis (DEN/UFPE).

Utilizou-se nos ensaios uma solução salina de  $CaCl_2$  a 0,01M. Um pulso de 1/2 volume de poros da solução foi aplicado às colunas de solo. Três ensaios foram realizados em cada coluna de solo. Adicionalmente, determinou-se o tempo do pulso em função da vazão da bomba peristáltica. O fluxo  $q$  [ $LT^{-1}$ ] aplicado foi obtido pela razão entre a vazão da bomba e a área transversal da coluna de solo,  $A=15,904 cm^2$ . A alimentação das colunas de solo com a solução salina foi efetuada em regime estacionário e fluxo constante descendente. Os efluentes da coluna foram coletados em intervalos de tempo discretos em frações de 0,02 volumes de poros até totalizar 2,5 volumes de poros.

## RESULTADOS

As curvas de eluição experimentais e ajustadas são apresentadas nas Figuras 3, 4, 5 e apresentam-se na forma de concentração adimensional ( $C/C_0$ ) em função do volume de poros relativo ( $V/V_0$ ).

A Figura 03 refere-se ao solo areia franca obtidas nas três repetições. As curvas de eluição apresentaram um comportamento semelhante durante a parte ascendente da solução deslocadora, sendo a parte descendente da curva ligeiramente diferentes entre elas, principalmente para o ensaio 3, onde a curva apresentou uma assimetria (tailing) na parte final. Esta assimetria está provavelmente relacionada a um comportamento a duas regiões de água (móvel e imóvel).

As curvas de eluição do solo franco argilo arenoso (Figura 04) apresentaram um aparecimento prematuro da concentração em relação aos demais solos. Este comportamento é consequência de uma distribuição do tamanho de poros menor para este solo, o que é representado por uma dispersividade maior em relação aos demais solos, como será visto mais adiante.

Para o caso do solo arenoso (Figura 05), as curvas de eluição para as três repetições são praticamente idênticas. Três outros ensaios (Figura 06) com velocidades diferentes (ensaio 10  $v=27,97 cm.d^{-1}$ ; ensaio 11  $v=19,36 cm.d^{-1}$ ; ensaio 12  $v=87,56 cm.d^{-1}$ ) foram realizados com a coluna de solo arenoso, visando observar a relação entre o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e a velocidade da água nos poros. Observa-se na Figura 06 que a medida que a velocidade aumenta a curva de eluição se desloca para a esquerda, provocando um aumento na frente de avanço do soluto na coluna de solo. Pode-se ob-

servar também uma variação da inclinação da parte ascendente das curvas. A medida que a velocidade aumenta, o ramo ascendente se torna mais íngreme. Este fenômeno se traduz por uma predominância da convecção sobre a dispersão ( $Pe$  se torna maior). Nos ensaios realizados sobre a mesma coluna de solo, as curvas de eluição apresentaram uma variação na altura do pico, esse fato é devido a velocidade da água nos poros, bem como as condições experimentais.

No caso CDE-MIM, o modelo considera que a água é fracionada em móvel e imóvel; isso conduz à determinação dos parâmetros  $\alpha [T^{-1}]$  e  $\theta_m$ , definidos respectivamente como o coeficiente de transferência de massa entre as duas frações de água e teor de água móvel, respectivamente. O tempo de pulso ( $t_0$ ) experimental, estimado em 1/2 volume de poros, teve seus valores ajustados no modelo. Esse ajuste na verdade é uma correção devido aos erros sistemáticos em função do arranjo experimental.

Em todos os ensaios realizados os valores do tempo de pulso ( $t_0$ ) experimental encontram-se na mesma ordem de grandeza que os valores de  $t_0$  ajustados. O número de Péclet mostra que o processo predominante em todos os ensaios foi a convecção ( $Pe > 10$ , Novy Quadry, 1993).

As velocidades da água nos poros ( $v$ ) ajustadas apresentaram seus valores ligeiramente superiores às velocidades experimentais para as colunas de areia franca e franco argilo-arenosa. O mesmo não foi obtido na coluna de solo arenoso, onde os valores ajustados foram aproximadamente 25% superiores aos valores experimentais e calculados. Este fato foi observado em todos os ensaios (7, 8, 9, 10, 11 e 12) realizados nesta coluna.

Para um meio totalmente saturado, onde toda a água é considerada móvel, a curva de eluição de um traçador ideal passa pelo ponto (0,5  $C/C_0$ ; 1,0  $V/V_0$ ). No entanto, as curvas de eluição (Figuras 3, 4, 5 e 6) encontram-se deslocadas para a esquerda, ou seja, o ponto  $C/C_0 = 0,5$  ocorre antes do valor  $V/V_0 = 1,0$ . Isso está relacionado a uma possível saturação parcial nas colunas de solo, ocasionando uma grande distribuição de velocidades no meio poroso, fazendo com que o soluto apareça mais cedo na saída da coluna de solo.

Observa-se que os ensaios realizados na mesma coluna apresentaram valores de  $D$  diferenciados. No entanto, tomando-se a média dos valores, pode-se verificar que os desvios-padrão correspondem a uma variação em relação ao valor médio de aproximadamente 20% na coluna de solo de areia franca, 11% na coluna franco argilo-arenosa e 9% na coluna de solo arenoso (Tabela 01).

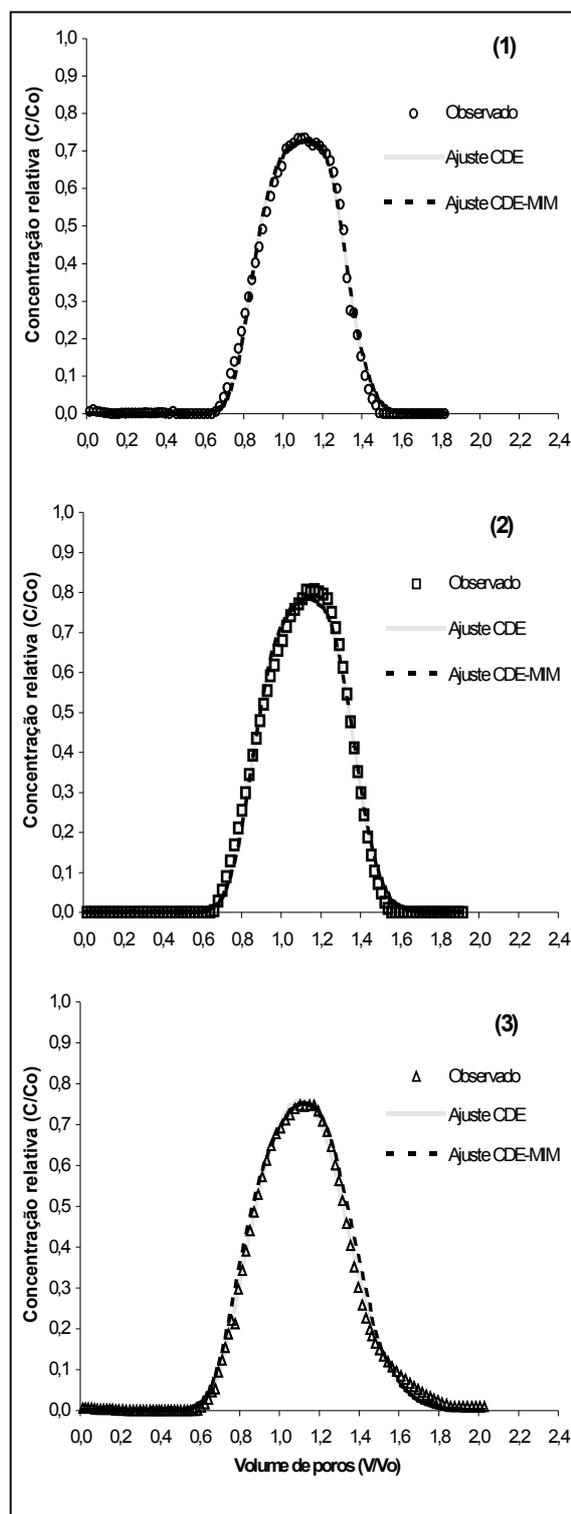


Figura 3 – Curvas de eluição experimental e dos ajustes CDE e CDE-MIM dos ensaios na coluna de solo areia franca.

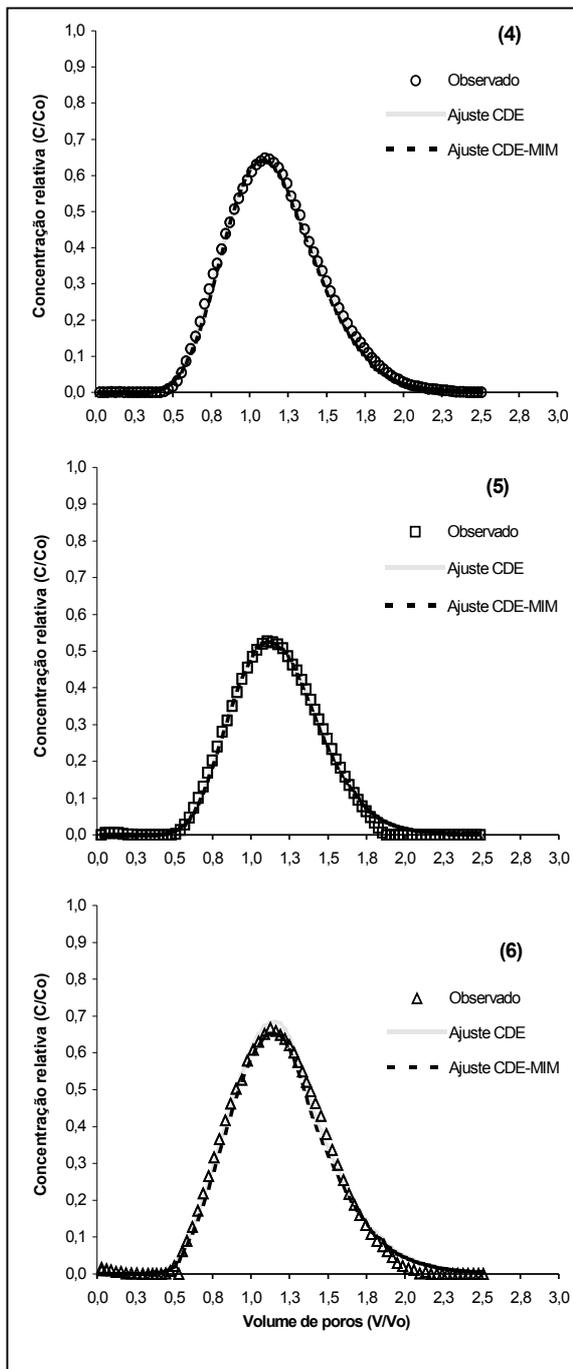


Figura 4 - Curvas de eluição experimental e dos ajustes CDE e CDE-MIM dos ensaios na coluna de solo franco argilo arenosa.

As curvas experimentais (Figuras 3 a 6) possuem uma distribuição simétrica; logo o comprimento das colunas de solo é compatível com os processos de transporte.

O parâmetro adimensional  $\omega$  ( $n^0$  de Damkohler) incorpora em sua definição o coeficiente  $\alpha$  [L], o qual descreve a transferência difusiva entre as duas regiões de água (Parker e van Genuchten, 1984). Valores muito grandes ou muito pequenos produzem curvas de eluição simétricas. Assim, quanto maior o valor de  $\omega$ , menor será a resistência para que a transferência difusiva de soluto entre as duas regiões ocorra, garantindo assim que a troca entre a água móvel e imóvel seja instantânea (Schindwein, 1998). Na medida em que esse parâmetro assume valores muito pequenos, como no caso dos dados apresentados na Tabela 02, significa dizer que o sistema se afastou do equilíbrio local. Neste caso, a abordagem do modelo CDE-MIM tem mais êxito na descrição das curvas de eluição. Isso explica o grande interesse e a ampla aplicação deste tipo de modelo no transporte de solutos. Observa-se que os valores de  $\omega$  foram todos ajustados para o valor mínimo de  $10^{-5}$ .

Novy Quadry (1993), realizando o estudo de sensibilidade do parâmetro  $\omega$ , chegou à conclusão que, para valores extremos de  $\omega$ , deve-se privilegiar o valor mais elevado, garantindo assim uma troca instantânea entre as regiões de água móvel e imóvel.

Segundo o trabalho de Renard et al. (1977), o coeficiente de dispersão hidrodinâmica é um dos parâmetros mais sensíveis aos erros de medidas das frações de concentrações coletadas, bem como a variação na distribuição das velocidades da água nos poros. Trata-se, portanto, de um dos parâmetros essenciais na transferência de solutos em solos, e por esta razão a sua determinação deve ser feita com o máximo rigor. Pode-se observar na Tabela 01 que os valores dos coeficientes de variação para os coeficientes de dispersão são maiores que aqueles determinados para as velocidades da água nos poros. O valor médio do coeficiente de dispersão para o solo franco argilo-arenoso é maior do que aquele obtido com os outros dois solos (areia franca e arenoso), caracterizando assim um efeito mais pronunciado da dispersão para este solo. Sendo o número de Péclet bem menor para o solo franco argilo-arenoso do que para os demais solos, o que indica uma dispersividade ( $\lambda$ ) mais importante do que para os solos areia franca e arenoso. O valor médio da dispersividade para o solo franco argilo-arenoso chega a ser 4,7 e 9,4 vezes superior do que a dispersividade para os solos areia franca e arenoso respectivamente. Para os ensaios 10 a 12 (solo arenoso) observa-se que o valor dos coeficientes de dispersão  $D$  diminui à medida que se diminuem os fluxos aplicados, indicando a existência de uma relação entre o coeficien-

te de dispersão hidrodinâmica e a velocidade da água nos poros.

Quando os valores do coeficiente de transferência de massa ( $\alpha$ ) entre as duas frações de água são muito pequenos, o processo de difusão nos ensaios realizados é desprezível. Nestes casos, praticamente não existe transferência de massa entre as duas frações de água, sendo o processo predominantemente convectivo. Esse fato também é explicado pelos altos valores obtidos para o número de Péclet ( $Pe > 10$ ).

O parâmetro adimensional  $\beta$  incorpora na sua definição o coeficiente de distribuição de solutos ( $K_d$ ) entre as duas regiões de água. Como mencionado anteriormente a matriz sólida é inerte e o soluto é não reativo, logo o  $K_d=0$ ; conseqüentemente o valor de  $\beta$  é igual ao fator  $f$ .

Observa-se nos ensaios de 1 a 9 (Tabela 02) que os valores de  $\beta$  são muito próximos de 1,00 para a coluna de solo de areia franca e diminuem para o solo franco argilo-arenoso e arenoso, com valores médios de 0,97 e 0,93 respectivamente. Observa-se também (Tabela 02) que a medida que diminui o fluxo de água aplicado na coluna de solo arenosa, a fração de água móvel ( $\beta$ ) se torna significativa.

Nota-se ainda que não foram observadas variações significativas nos valores da dispersividade para os ensaios realizados sobre a mesma coluna de solo. Por outro lado, a média dos valores da dispersividade foram maiores na coluna de solo franco argilo-arenoso (1,63 cm) do que nas colunas de solo de areia franca (0,34 cm) e arenoso (0,17 cm). Com base nessa comparação, pode-se dizer que nos solos com teores de argila e silte significativos, a distribuição do soluto é maior do que nos solos arenosos, para os casos estudados.

Comparando-se os resultados dos parâmetros obtidos a partir dos modelos CDE e CDE-MIM, pode-se observar que, para os parâmetros  $D$ ,  $v$ ,  $\lambda$  e  $Pe$ , os valores foram praticamente os mesmos, com exceção dos ensaios de 7 a 9 onde os valores dos parâmetros  $v$  e  $D$  obtidos com o modelo CDE-MIM são em média de 10 % inferiores àqueles obtidos com o modelo CDE.

Nos resultados apresentados (Figuras 4, 5 e 6) observa-se que não existem diferenças entre as curvas ajustadas pelos dois modelos (CDE e CDE-MIM). Portanto, para os solos utilizados e as condições experimentais aplicadas, tanto o modelo convecção-dispersão (CDE) quanto o modelo convecção-dispersão a duas frações de água (CDE-MIM) podem ser aplicados. Desta forma, pode-se dizer que

os dois modelos utilizados neste estudo produziram valores confiáveis dos parâmetros hidrodispersivos.

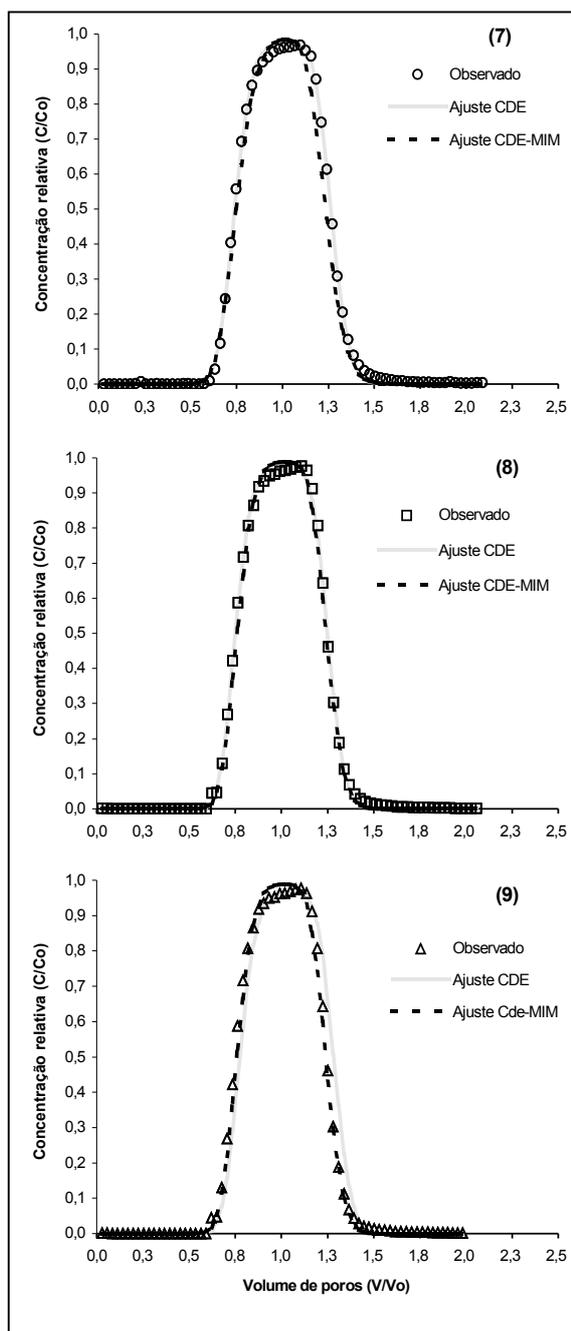


Figura 5 - Curvas de eluição experimental e dos ajustes CDE e CDE-MIM dos ensaios na coluna de solo arenosa.

**Tabela 01 – Resultado dos ajustes dos parâmetros hidrodispersivos utilizando o modelo CDE.**

Ensaio	q (cm.d <sup>-1</sup> )	v (cm.d <sup>-1</sup> )	D (cm <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup> )	t <sub>0</sub> (d)	λ (cm)	Pe
<b>Coluna de areia franca</b>						
1	7,69	22,61	4,92	1,01	0,22	183,67
2	7,50	22,03	7,20	1,09	0,33	122,37
3	6,95	17,93	8,79	0,88	0,49	81,62
<i>Média</i>	7,38	20,86	6,97	0,99	0,34	-
<i>DP</i>	0,272	1,804	1,373	0,074	0,097	-
<i>CV</i>	3,68	8,65	19,70	7,46	28,09	-
<b>Coluna franco argilo-arenosa</b>						
4	11,09	28,17	52,33	0,73	1,86	21,53
5	12,37	31,03	40,97	0,73	1,32	30,30
6	14,14	32,92	55,89	0,66	1,70	23,56
<i>Média</i>	12,53	30,71	49,73	0,70	1,63	-
<i>DP</i>	1,083	1,691	5,510	0,030	0,195	-
<i>CV</i>	8,64	5,51	11,08	4,20	12,00	-
<b>Coluna arenosa</b>						
7	62,02	186,60	35,98	0,15	0,19	207,45
8	61,17	181,00	28,64	0,15	0,16	252,79
9	60,49	174,90	29,57	0,15	0,17	236,59
<i>Média</i>	61,23	180,83	31,40	0,15	0,17	-
<i>DP</i>	0,545	4,138	2,826	0,002	0,013	-
<i>CV</i>	0,89	2,29	9,00	1,49	7,22	-
10	12,45	36,02	5,77	0,77	0,16	249,71
11	8,61	28,64	2,85	0,86	0,10	401,96
12	38,96	121,30	12,20	0,21	0,10	397,70

**Tabela 02 - Resultado dos ajustes dos parâmetros hidrodispersivos utilizando o modelo CDE-MIM.**

Ensaio	q (cm.d <sup>-1</sup> )	v (cm.d <sup>-1</sup> )	D (cm <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup> )	t <sub>0</sub> (d)	β	ω	θm	α (d <sup>-1</sup> )	λ (cm)	Pe
<b>Coluna de areia franca</b>										
1	7,69	20,07	4,38	1,01	0,987	1,00E-05	0,395	1,92E-06	0,22	183,29
2	7,50	21,79	7,10	1,09	0,988	1,00E-05	0,395	1,88E-06	0,33	122,76
3	6,95	17,99	7,92	1,08	0,955	1,00E-05	0,382	1,74E-06	0,44	90,86
<i>Média</i>	7,38	19,95	6,47	1,06	0,98	-	0,39	-	0,33	-
<i>DP</i>	0,314	1,554	1,513	0,037	0,015	-	0,006	-	0,091	-
<i>CV</i>	4,25	7,79	23,40	3,54	1,58	-	1,57	-	27,63	-
<b>Coluna franco argilo-arenosa</b>										
4	11,09	24,95	46,02	0,76	0,974	1,00E-05	0,429	2,77E-06	1,84	21,69
5	12,37	29,65	39,32	0,72	0,958	1,00E-05	0,421	3,09E-06	1,33	30,16
6	14,14	34,99	50,39	0,84	0,963	1,00E-05	0,424	3,53E-06	1,44	27,78
<i>Média</i>	12,53	29,86	45,24	0,77	0,97	-	0,42	-	1,54	-
<i>DP</i>	1,251	4,102	4,553	0,049	0,007	-	0,003	-	0,222	-
<i>CV</i>	9,98	13,73	10,06	6,38	0,69	-	0,69	-	14,47	-
<b>Coluna arenosa</b>										
7	62,02	155,70	29,66	0,15	0,934	1,00E-05	0,416	1,73E-05	0,19	209,98
8	61,17	166,40	26,23	0,15	0,919	1,00E-05	0,409	1,85E-05	0,16	253,76
9	60,49	165,50	27,68	0,15	0,949	1,00E-05	0,422	1,84E-05	0,17	239,16
<i>Média</i>	61,23	162,53	27,86	0,15	0,93	-	0,42	-	0,17	-
<i>DP</i>	0,630	4,846	1,406	0,003	0,012	-	0,005	-	0,014	-
<i>CV</i>	1,03	2,98	5,05	1,76	1,28	-	1,28	-	8,03	-
10	12,45	28,81	4,68	0,77	0,801	1,00E-05	0,356	3,11E-06	0,16	246,50
11	8,64	23,89	3,26	0,83	0,816	1,00E-05	0,363	2,16E-06	0,14	293,13
12	38,96	118,30	11,82	0,21	0,979	1,00E-05	0,436	9,74E-06	0,10	400,34

## CONCLUSÕES

As curvas de eluição obtidas nos ensaios de deslocamento de líquido miscível representaram com fidelidade o transporte de água e solutos no solo, mostrando que este tipo de ensaios é uma boa ferramenta no estudo dos processos hidrodispersivos.

Para o tipo de ensaio e as condições utilizadas, tanto o modelo CDE como o modelo CDE-MIM representa com fidelidade as curvas de eluição experimentais. Seria provável que para o caso de colunas de solo não-saturadas, o modelo que melhor representaria as curvas de eluição experimentais seria o modelo CDE-MIM.

Com exceção das velocidades superiores a  $100 \text{ cm.d}^{-1}$ , as velocidades estimadas pelos ajustes das curvas de eluição utilizando os modelos CDE e CDE-MIM são próximas às obtidas experimentalmente.

Foi constatado nos ensaios que a variação do tamanho de poros e a diminuição do fluxo aplicado nos solos utilizados ocasiona um aumento na variabilidade da velocidade da água nos poros, caracterizado pelo coeficiente de variação. A relação entre  $D$  e  $v$ , observada a partir dos ensaios com o solo arenoso (7 a 12) parece ser linear. O valor estimado da dispersividade, correspondendo ao coeficiente angular da reta, está dentro da faixa de valores calculados para cada ensaio.

## REFERÊNCIAS

- BEAR, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, New York, NY.
- BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. (1962). A some comments on molecular diffusion and hydrodynamic dispersion in porous media. J. of Geophysical Research. 67: 3636-3637.
- BIGGAR, J.W., NIELSEN, D.R. (1976) Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. Water Resour. Res. 12 (1): 78-84.
- COAST, K.H., SMITH, B.D. (1964) Dead-end pore volume and dispersion in porous media. Society of Petroleum Engineers Journal. March: 73-84.
- CUNHA, R. C. A.; CAMARGO, O. A.; KINJO, T. (1996). Eluição de duas fontes de zinco aplicadas em horizontes superficiais de um podzólico e de um latossolo. R. Bras. Ci. Solo. 20: 371-378.

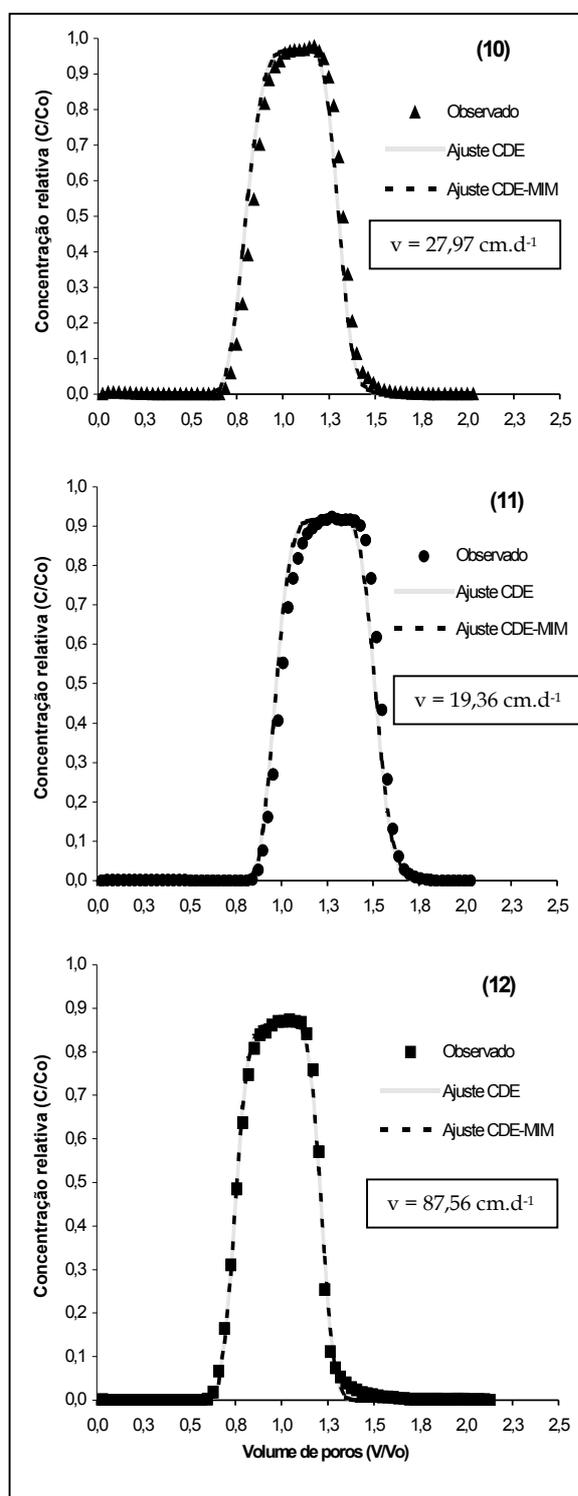


Figura 6 – Curvas de eluição da variação das velocidades na coluna de solo arenosa.

- FEIKE, L.J.; DANE, J.H. (1992). Moment method applied to solute transport with binary and ternary exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 667-674.
- FRIED, J.J., COMBARNOUS, M.A. (1971). *Advances in Hydroscience*; 7: 169-282; Dispersion in porous media.
- GAUDET, J.P.; JEGAT, H.; VACHAUD, G.; WIERENGA, P. (1977). Solute transfer, with exchange between mobile and stagnant water, through unsaturated sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: n.º 4.
- GELHAR, L. W., C. WELTY, K. R. REHFELDT. (1992). A critical review of field-scale dispersion in aquifers. *Water Resour. Res.* 28: 1955-1974.
- JURY, W.A., G. SPOSITO (1985). Field Calibration and Validation of Solute Transport Models for the Unsaturated Zone. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:1331-1341.
- LEIJ, F.J.; TORIDE, N. (1995). Discrete time and length-averaged solutions of the advection-dispersion equation. *Water Resour. Res.* 31: 1713-1724.
- LEITE, J. P.; SKOGLEY, E. O. (1977). Retention and leaching of copper and zinc in "tabuleiro" soil as influenced by nutrient carrier. *Pesq. Agropec. Bras., Brasília.* 12: 27-34.
- NASCIMENTO FILHO, V. F.; REICHARDT, K. and LIBARDI, P. L. (1979). Deslocamento miscível do íon cloreto em terra roxa estruturada (alfisol) saturada em condições de campo. *R. Bras. Ci. Solo.* 3: 67-73.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. (1961). Miscible displacement in soil: I. Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25: 1-5.
- NOVY QUADRI, M.B. (1993). L'infiltrométrie multi-disques pour la caractérisation hydro-dispersive des sols non saturés: modélisation des transferts et applications. Thèse (Doctorat) – Université Joseph Fourier. Grenoble.
- OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F.; FERREIRA, P. A. (1999). Comparação de metodologias de determinação do coeficiente de dispersão para o cloreto de cálcio em um latossolo vermelho-amarelo. *R. Amb. de Eng. Agrícola e Ambiental.* 3: 7-10.
- PAKER, J. C.; VAN GENUCHTEN, M. TH. (1984). Flux-average and volume-average concentration in continuum approaches to solute transport. *Water Res. Research.* 20: 866-872.
- RENARD, J.L.; CALVET, R. ; TOURNIER, C.; HUBERT, A. (1977). Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamic longitudinal dans un milieu poreux saturé. *Ann. Agronomiques.* 28: 47-64.
- ROTH, K. (1996). Lecture notes in soil physics. Institute of Soil Science, University of Hohenheim. Version 3.2.
- SCHINDWEIN, S. L. (1998). Parametrização do transporte dispersivo de solutos em solos estruturados: heterogeneidade do meio, percurso de transporte e modelagem. *R. Bras. Ci. Solo.* 22: 173-179.
- SÉGOL, G. (1993). *Classic groundwater simulations: Proving and improving numerical models.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. (1993). A comprehensive set of analytical solutions for solute transport with first-order decay and zero-order production. *Water Resour. Res.* 29: 2167-2182.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.; ALVES, W.J. (1982). Analytical solutions of the one dimensional convective-dispersive solute transport equation.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.; WIERENGA, P.J. (1986). Solute dispersion coefficients and retardation factors. *In methods of soil analysis. I. Physical and Mineralogical methods.* Soil Sci. Soc. Madison, Wis.

***Essays of Miscible Displacement to Determine Hydrodispersive Parameters of an Alluvial Soil***

**ABSTRACT**

*Essays on the displacement of miscible liquid in soil columns in the laboratory were applied to hydrodispersive characterization of three soil samples with different textural classes: sandy loam, sandy clay loam and sand, from Alluvial soil on the banks of Cajueiro Dam in the Brazilian semi-arid. The essays comprise the displacement of 1/2 pulse pore volume from the CaCl<sub>2</sub> solution at 0.01 M in soil columns under saturation conditions and steady water flow regime. The solute transport parameters were obtained by adjusting the analytical solution of the convection-dispersion equation CDE ( $v$ ,  $D$ ), and the mobile-immobile solute transport model CDE-MIM ( $v$ ,  $D$ ,  $b$  and  $w$ ), to the breakthrough curve points, by using the CXTFIT 2.0 computer program.*

*Key-words: miscible displacement, dispersivity, breakthrough curves.*

