

**PROPAGAÇÃO DE NITRATOS NA ZONA VADOSA DO SOLO**  
**Apresentação de um Ensaio de Traçador Realizado no**  
**“Aquífero Artificial” do GIAS**

**Teresa Eira LEITÃO<sup>(1)</sup>; Seán P. QUIGLEY<sup>(2)</sup>; J.P. Cárcamo LOBO FERREIRA<sup>(3)</sup>**

**RESUMO**

O presente artigo descreve uma parte do trabalho desenvolvido no âmbito de um Projecto Comunitário, em curso no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, intitulado “*Modelling of Miscible Pollutant Transport by Underground Water in Non-Saturated Zones*”, com a Universidade de Liège (Bélgica) e a Universidade Tecnológica de Dalian (R.P. da China).

Apresentam-se os resultados de um ensaio de traçador efectuado com nitratos no “aquífero artificial” do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do DH/LNEC. Com os resultados obtidos nos ensaios, quantificam-se os principais processos responsáveis pela migração dos nitratos em profundidade, em condições de não-saturação. A análise dos processos está a ser efectuada com base num modelo matemático desenvolvido no âmbito do projecto referido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Zona Vadosa; Migração; Ensaio de Traçador; Nitratos.

---

<sup>(1)</sup> Geóloga, Doutora em Hidrogeologia  
Equiparada a Investigadora Auxiliar do  
Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do DH/LNEC

<sup>(2)</sup> Engenheiro Químico  
Ex-Bolseiro do Programa Leonardo no  
Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do DH/LNEC

<sup>(3)</sup> Doutor em Engenharia Civil  
Investigador Principal e Chefe do  
Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do DH/LNEC

## **1 - INTRODUÇÃO**

O trabalho que se apresenta insere-se no âmbito de um estudo mais vasto, em curso no LNEC, que tem por objectivo aprofundar os conhecimentos no domínio do transporte de poluentes miscíveis na zona vadosa (zona não-saturada do solo) LEITÃO *et al.* (1997 a e b).

O projecto tem como objectivo último o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos bi-dimensional, a testar e calibrar com base em ensaios experimentais realizados a duas escalas: (1) em laboratório (coluna de ensaio com 0,112 m x 0,5 m) e (2) num modelo físico, i.e. num “aquífero artificial” (2 m x 4 m x 1,5 m).

Nesta comunicação apresenta-se a parte do estudo relativa aos ensaios de traçador realizados no “aquífero artificial” do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas (GIAS), para um grau de saturação entre 60 – 80%, utilizando nitrato como traçador.

## **2 - OBJECTIVOS GERAIS DO ESTUDO**

Os objectivos dos ensaios descritos nesta comunicação podem resumir-se nos seguintes três aspectos principais:

- a) a identificação e quantificação dos principais parâmetros físicos que controlam a circulação na zona vadosa (condutividade hidráulica correspondente a um determinado grau de saturação, etc.);
- b) a determinação e quantificação de processos que controlam a migração dos nitratos na zona vadosa; e
- c) a obtenção de dados para a calibração dos modelos.

Presentemente estão a ser identificados e quantificados os parâmetros de escoamento e de transporte dos ensaios, pelo que essa informação não é aqui disponibilizada.

## **3 - CONTEXTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL**

Os meios geológicos reais, mesmo quando aparentemente homogéneos, podem apresentar apreciáveis heterogeneidades, com significativas variações espaciais das suas propriedades hidrogeológicas. A aplicação de um modelo determinístico requer, contudo, a entrada de dados que representem a média dos valores obtidos. Deste modo, a importância de obter valores experimentais a diferentes escalas é essencial para estabelecer a validade da aplicação de modelos a situações e escalas representativas da escala real.

Se por um lado as colunas de ensaio permitem um maior domínio dos fenómenos, facilitando o seu isolamento e calibração e, ainda, o controlo das condições iniciais e de fronteira, por outro lado são menos representativas do meio real. Os modelos físicos, embora de mais difícil domínio, conduzem a resultados mais próximos da realidade, uma vez que integram uma maior porção do meio.

Neste estudo foram efectuados numerosos ensaios, utilizando volumes a ensaiar diversos: coluna e “aquífero artificial”. Na comunicação apenas se apresentam os ensaios realizados no “aquífero artificial”, muito embora se faça uso de dados obtidos na coluna de ensaio.

## **4 - DADOS INICIAIS UTILIZADOS**

Antes de se dar início à realização dos ensaios de traçador, diversos outros ensaios foram realizados, a diferentes escalas, por forma a melhor conhecer as propriedades hidráulicas do solo utilizado.

Foram realizados ensaios numa coluna com 0,112 m de diâmetro por 0,5 m de altura para determinar permeabilidade do solo arenoso e, também, a velocidade e dispersão para diferentes graus de saturação. Foram, ainda, determinados os valores da porosidade e do peso específico aparente.

Os parâmetros calibrados a esta escala foram utilizados para programar os ensaios realizados a escalas maiores. Os valores de permeabilidade serviram para calcular a velocidade de circulação da água e, assim, determinar a melhor posição dos amostradores para recolha de água bem como a altura mais indicada para a recolha de amostras.

## **5 - ENSAIOS NO AQUÍFERO ARTIFICIAL**

### **5.1 Descrição da estrutura e equipamentos utilizados**

O “aquífero artificial” teve como intenção representar uma escala real, como se de um ensaio *in situ* se tratasse, onde o controlo das condições iniciais e de fronteira fosse possível.

O “aquífero artificial” consiste numa estrutura em caixa, com 4 m de comprimento, 2 m de altura e 1,5 m de largura, preenchida com areia de Almada, conforme se esquematiza na Figura 1. O acesso à superfície faz-se por uma escada que dá acesso a uma plataforma lateral de apoio.

A entrada de água é efectuada por um tubo perfurado, suspenso a 5 cm da superfície do solo. O tubo perfurado está dobrado em U, sendo a irrigação do solo feita através de 20 válvulas de fluxo ajustável, introduzidas no tubo em U de 0,4 em 0,4 m. A saída de água do aquífero é feita pela extremidade inferior direita (ver Figura 1).

Para o desenvolvimento dos ensaios foram instaladas as seguintes estruturas: três cápsulas de cerâmica (Figura 2) e dois piezómetros.

As três cápsulas de cerâmica, dispostas em triângulo e separadas entre si 0,5 m, encontram-se instaladas às profundidades: 0,5; 0,9 e 1,3 m. Os dois piezómetros, cujos ralos se encontram no último 0,5 m, são totalmente penetrantes e distam entre si 1 m (Figura 3).

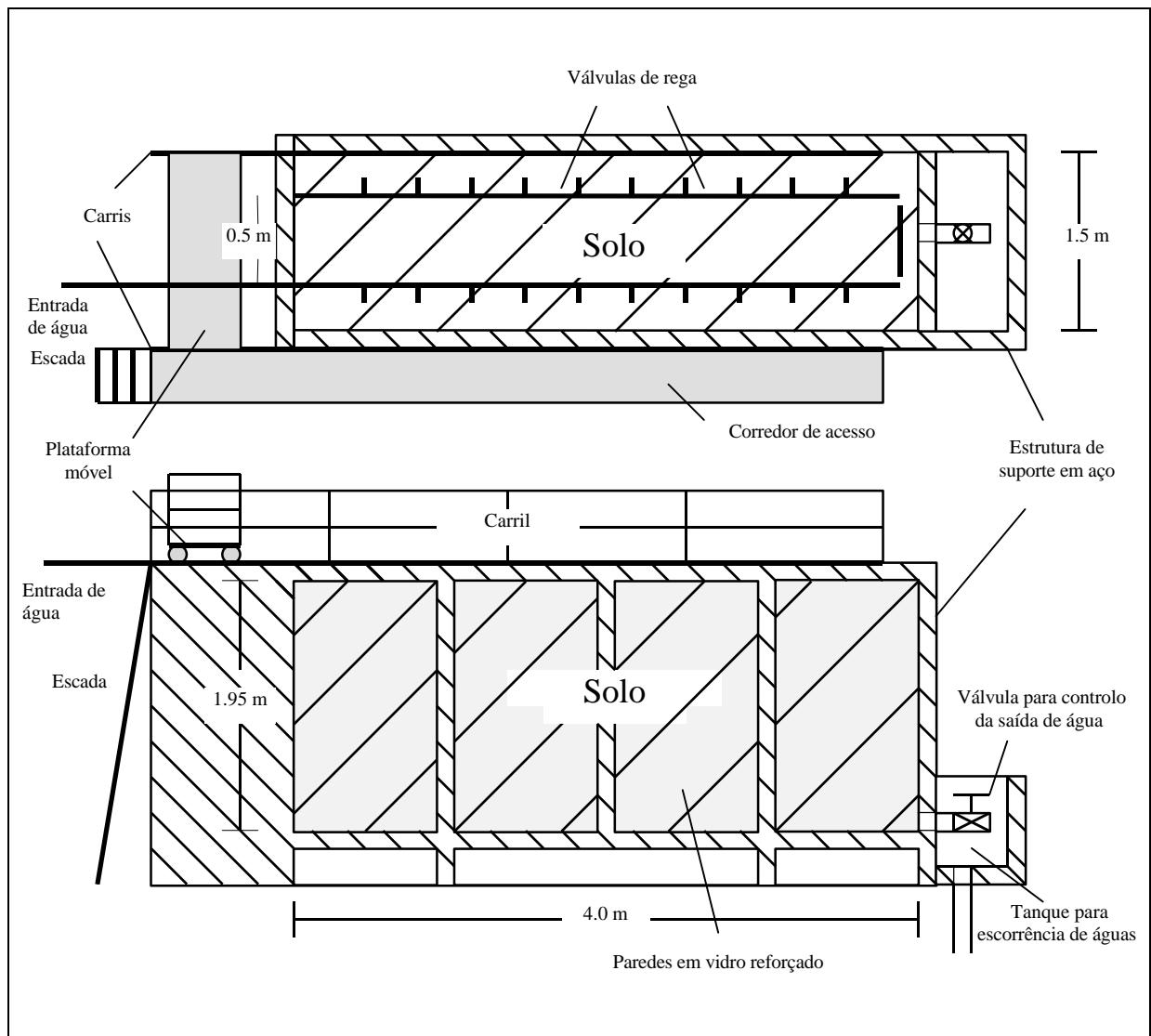


Figura 1 - “Aquífero Artificial”: Esquema em Planta e em Perfil

As Figuras 4 e 5 são fotografias com a panorâmica geral do “aquífero artificial”, onde é possível ver o equipamento utilizado que consiste, essencialmente, numa sonda do nível piezométrico, amostrador para recolha de água, bomba manual de vácuo, medidor de parâmetros físico-químicos e um polycorder/easylogger para registo e armazenamento de dados.

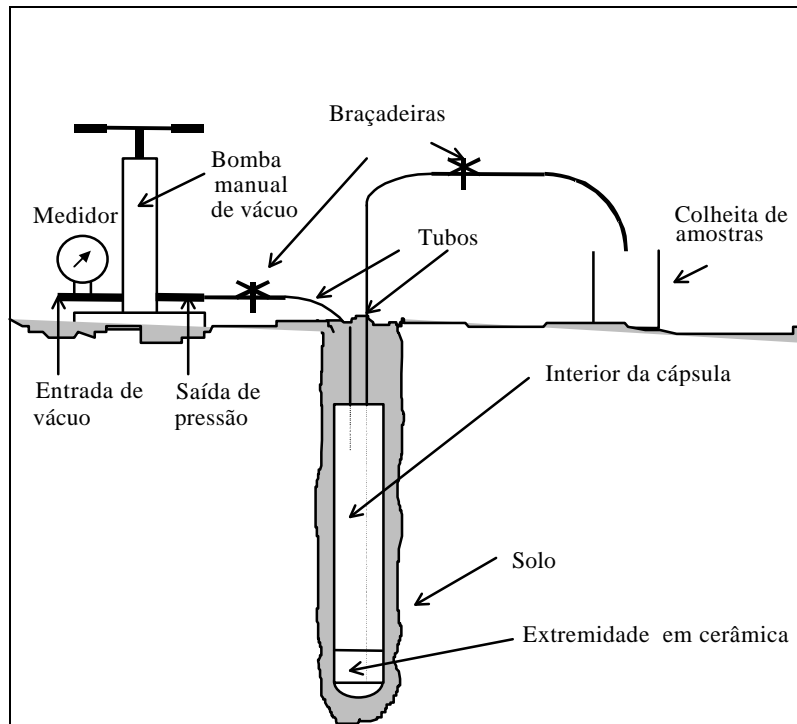


Figura 2 - Cápsula de Cerâmica e Acessórios

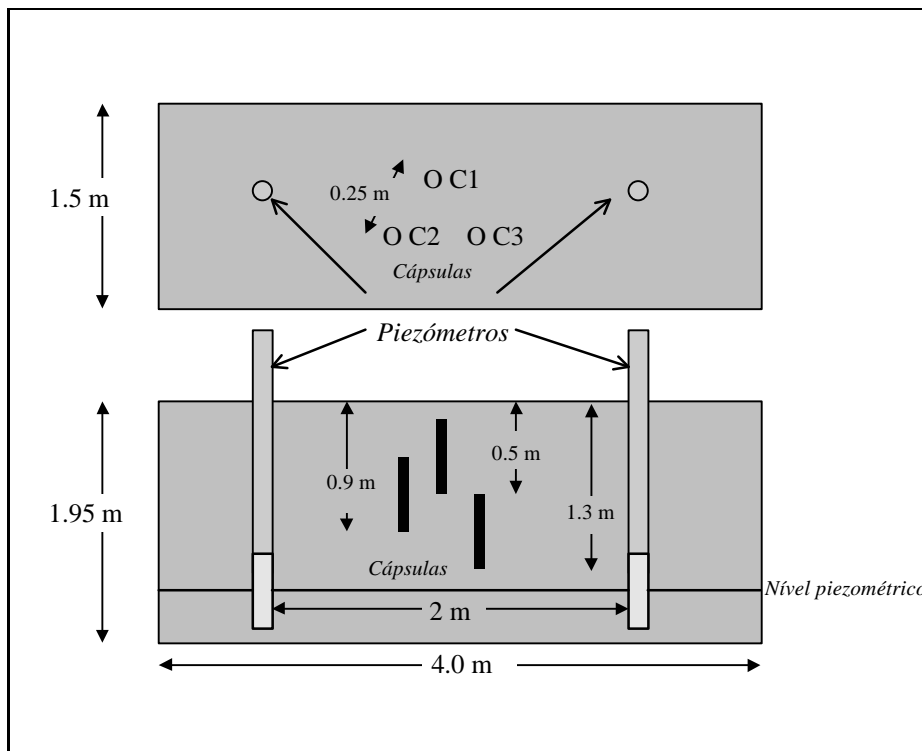


Figura 3 - Localização das Cápsulas de Cerâmica no “Aquífero Artificial”

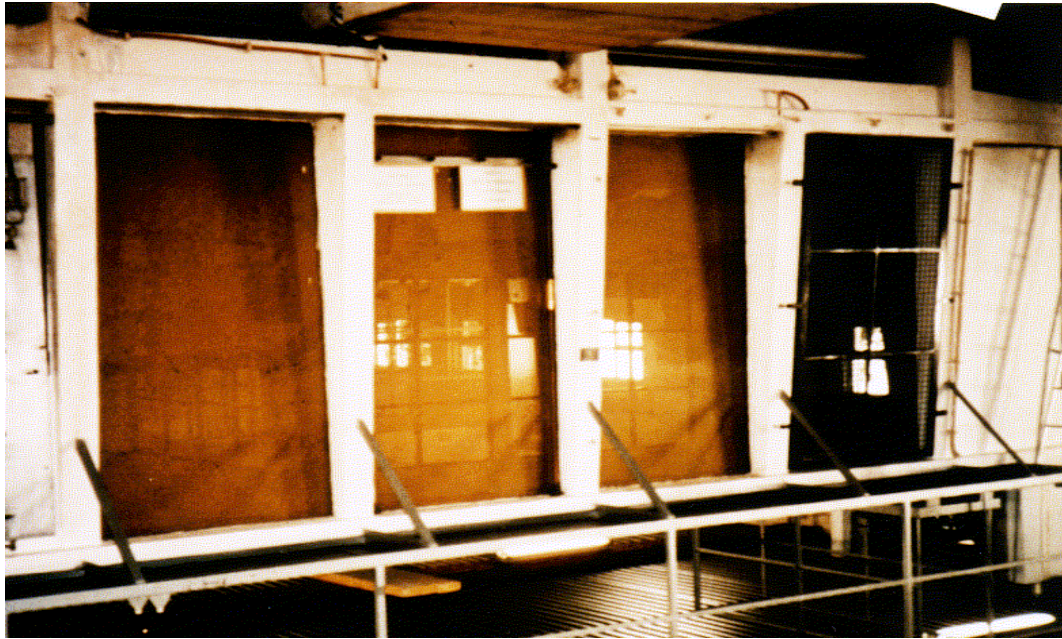


Figura 4 - Perspectiva Lateral do “Aquífero Artificial”

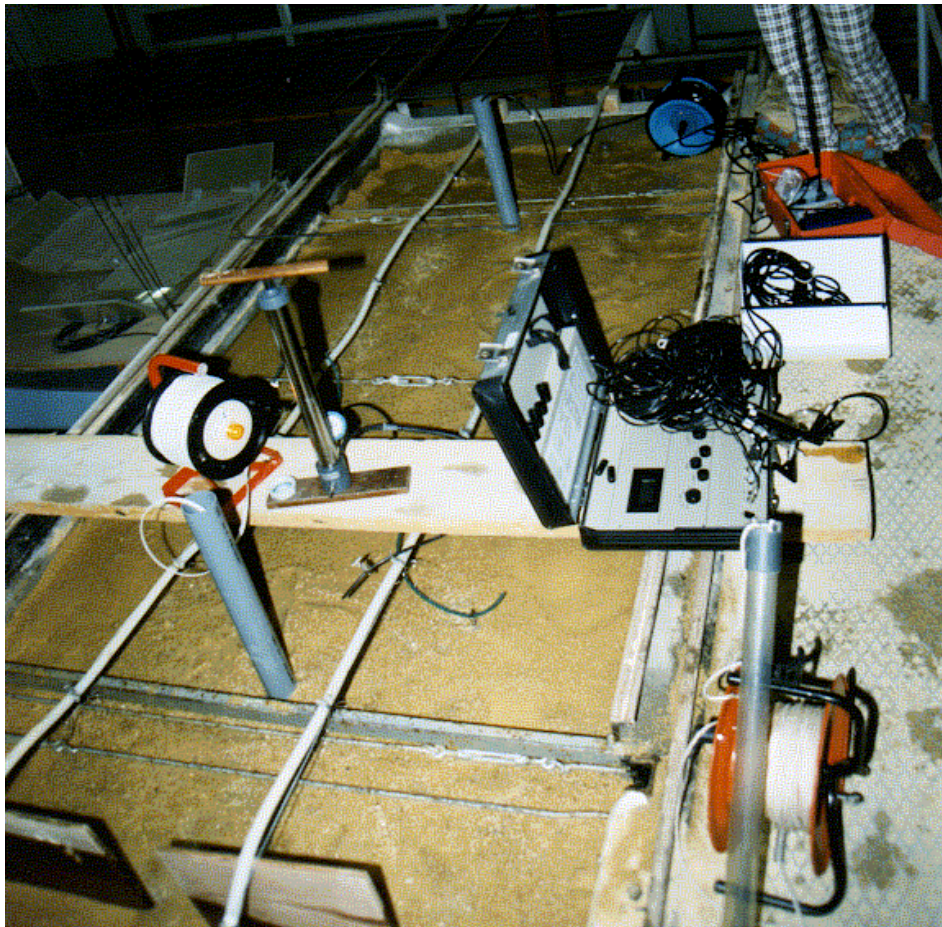


Figura 5 - Perspectiva em Planta do “Aquífero Artificial”

## 5.2 - Programa de trabalhos

A otimização dos recursos disponíveis para a realização dos ensaios conduziu a que se programasse a amostragem de cada cápsula de forma a registar o período crítico de chegada do traçador, para cada cápsula de cerâmica.

O programa de amostragem foi dividido tendo por base a realização de cerca de doze análises químicas para cada um dos pontos de amostragem ao longo do período em que se esperava a chegada do traçador, com períodos mais longos para a parte descendente da curva.

Foram estimadas as curvas de chegada do traçador a cada um dos três pontos de amostragem usando um modelo de transporte para condições de saturação (LEITÃO *et al.* (1996)). A utilização deste modelo, cujos resultados se apresentam na Figura 6, serviu apenas para dar uma ordem de grandeza dos tempos de chegada. O modelo aplica-se a condições de saturação e na simulação apenas se consideraram os parâmetros velocidade e dispersão, não integrando os parâmetros químicos do transporte. Essa análise será efectuada com o modelo para meios não-saturados, em fase de calibração.

### Curvas calculadas com o modelo de Valocchi ( $V = 1,48 \text{ m/dia}$ )

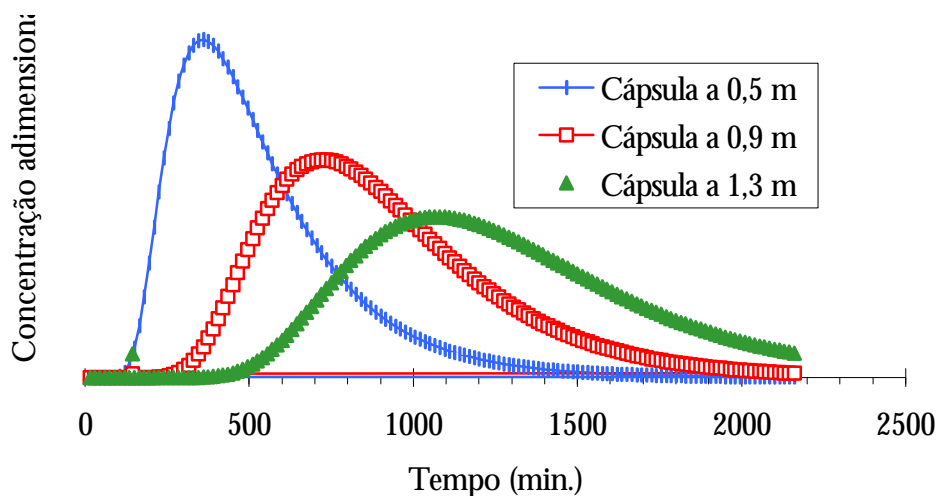


Figura 6 - Curvas Obtidas com o Modelo de Valocchi (LEITÃO *et al.* (1996))

## 5.3 - Ensaio realizados

Os ensaios foram realizados por um período de 48 horas, que decorreu das 18 h do dia 24 de Junho às 18 h de dia 26 de Junho de 1997.

Os ensaios que se apresentam foram realizados em condições de regime permanente e de não-saturação. A estabilização do regime de escoamento foi atingida ao fim de algumas

semanas de irrigação. Os ensaios foram realizados com o nível piezométrico a 30 cm da base, resultante da aplicação de uma entrada de água de 1,91 l/min.

Para a injeção do nitrato (durante 63 minutos) foram utilizados 55 l de traçador com a concentração de 77,49 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ . As amostras foram recolhidas de acordo com o programa de amostragem (cf. Quadro 1) e enviadas para o laboratório para análise do nitrato, nitrito e azoto amoniacal.

**Quadro 1**  
Programa de Amostragem

| Data     | Hora No. | Início | Cápsula 1 |                   | Cápsula 2 |                   | Cápsula 3 |                   |
|----------|----------|--------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
|          |          |        | Hora      | Tarefa a executar | Hora      | Tarefa a executar | Hora      | Tarefa a executar |
| 24/06/97 | 0        | 18:00  |           |                   |           |                   |           |                   |
| 24/06/97 | 1        | 19:00  | 19:15     | Aplica Vácuo      |           |                   |           |                   |
| 24/06/97 | 2        | 20:00  | 20:25     | Amostra a         |           |                   |           |                   |
| 24/06/97 | 3        | 21:00  | 21:15     | Aplica Vácuo      |           |                   |           |                   |
| 24/06/97 | 4        | 22:00  | 22:25     | Amostra b         | 22:25     | Aplica Vácuo      |           |                   |
| 24/06/97 | 5        | 23:00  | 23:15     | Aplica Vácuo      | 23:35     | Amostra a         |           |                   |
| 24/06/97 | 6        | 00:00  | 0:35      | Amostra c         | 0:25      | Aplica Vácuo      |           |                   |
| 24/06/97 | 7        | 01:00  | 1:20      | Aplica Vácuo      | 1:35      | Amostra b         | 01:40     | Aplica Vácuo      |
| 24/06/97 | 8        | 02:00  | 2:25      | Amostra d         | 2:25      | Aplica Vácuo      | 02:50     | Amostra a         |
| 24/06/97 | 9        | 03:00  | 3:15      | Aplica Vácuo      | 3:35      | Amostra c         | 03:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 10       | 04:00  | 4:45      | Amostra e         | 4:25      | Aplica Vácuo      | 04:40     | Amostra b         |
| 25/06/97 | 11       | 05:00  | 5:15      | Aplica Vácuo      | 5:35      | Amostra d         | 05:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 12       | 06:00  | 6:35      | Amostra f         | 6:25      | Aplica Vácuo      | 06:40     | Amostra c         |
| 25/06/97 | 13       | 07:00  | 7:15      | Aplica Vácuo      | 7:45      | Amostra e         |           |                   |
| 25/06/97 | 14       | 08:00  | 8:35      | Amostra g         | 8:25      | Aplica Vácuo      | 08:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 15       | 09:00  |           |                   | 9:35      | Amostra f         | 09:40     | Amostra d         |
| 25/06/97 | 16       | 10:00  | 10:15     | Aplica Vácuo      | 10:25     | Aplica Vácuo      |           |                   |
| 25/06/97 | 17       | 11:00  | 11:35     | Amostra h         | 11:35     | Amostra g         | 11:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 18       | 12:00  |           |                   | 12:25     | Aplica Vácuo      | 12:40     | Amostra e         |
| 25/06/97 | 19       | 13:00  | 13:15     | Aplica Vácuo      | 13:40     | Amostra h         |           |                   |
| 25/06/97 | 20       | 14:00  | 14:25     | Amostra i         |           |                   | 14:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 21       | 15:00  |           |                   | 15:15     | Aplica Vácuo      | 15:50     | Amostra f         |
| 25/06/97 | 22       | 16:00  | 16:20     | Aplica Vácuo      | 16:35     | Amostra i         |           |                   |
| 25/06/97 | 23       | 17:00  | 17:45     | Amostra j         |           |                   | 17:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 24       | 18:00  |           |                   | 18:15     | Aplica Vácuo      | 18:50     | Amostra g         |
| 25/06/97 | 25       | 19:00  | 19:15     | Aplica Vácuo      | 19:35     | Amostra j         |           |                   |
| 25/06/97 | 26       | 20:00  | 20:35     | Amostra k         |           |                   | 20:30     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 27       | 21:00  |           |                   | 21:25     | Aplica Vácuo      | 21:40     | Amostra h         |
| 25/06/97 | 28       | 22:00  | 22:10     | Aplica Vácuo      | 22:40     | Amostra k         | 22:50     | Aplica Vácuo      |
| 25/06/97 | 29       | 23:00  | 23:40     | Amostra l         |           |                   |           |                   |
| 25/06/97 | 30       | 00:00  |           |                   |           |                   | 00:00     | Amostra i         |
| 26/06/97 |          | 10:00  | 10:15     | Aplica Vácuo      | 10:15     | Aplica Vácuo      | 10:15     | Aplica Vácuo      |
| 26/06/97 |          | 11:00  | 11:30     | Amostra m         | 11:40     | Amostra l         | 11:30     | Amostra j         |
| 26/06/97 |          | 16:00  | 16:35     | Aplica Vácuo      | 16:35     | Aplica Vácuo      | 16:35     | Aplica Vácuo      |

|          |  |       |       |           |       |           |       |           |
|----------|--|-------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 26/06/97 |  | 18:00 | 18:00 | Amostra n | 18:00 | Amostra m | 18:00 | Amostra k |
|----------|--|-------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|

A qualidade da água à entrada e a saída do aquífero e, ainda, a do traçador, foi analisada para os iões maiores e para o carbono orgânico total.

#### 5.4 - Determinação do grau de saturação

As condições médias de saturação do meio, durante os ensaios, foram determinadas com base num conjunto de amostras recolhidas a diferentes profundidades. As amostras foram recolhidas com o auxílio de um trado manual.

As profundidades amostradas e os respectivos graus de saturação encontram-se esquematicamente representados na Figura 7.

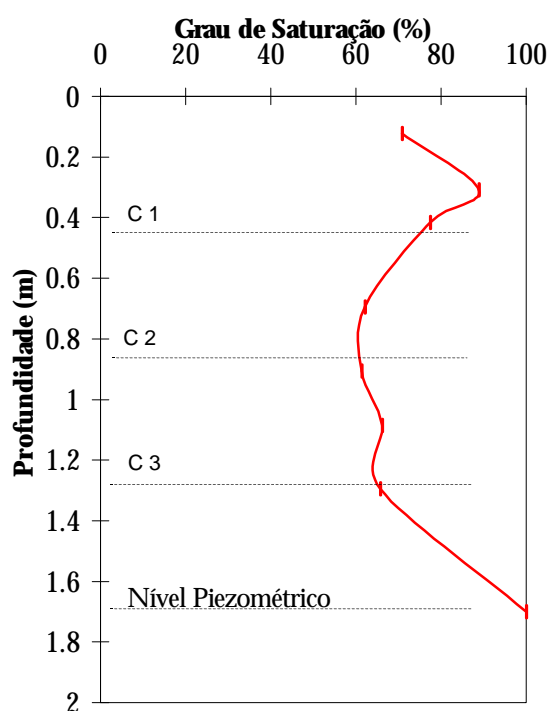


Figura 7 – Perfil de Saturação no “Aquífero Artificial”

Os resultados obtidos mostram que o grau de saturação não é constante no primeiro meio metro. A partir daí, o grau de saturação apresenta-se bastante homogêneo com valores que oscilam entre 61,4 e 66,2%.

#### 5.5 - Resultados obtidos

Face à incerteza inicial sobre o valor dos parâmetros de escoamento e de transporte e, também, à eventual ocorrência de fenómenos de “fingering”, i.e. de percolação vertical preferencial em diversas zonas (cf. LEITÃO *et al.* (1997)), consideram-se os resultados

obtidos bastante satisfatórios.

Na Figura 8 apresentam-se as concentrações de nitrato no tempo, para cada uma das três cápsulas de cerâmica.

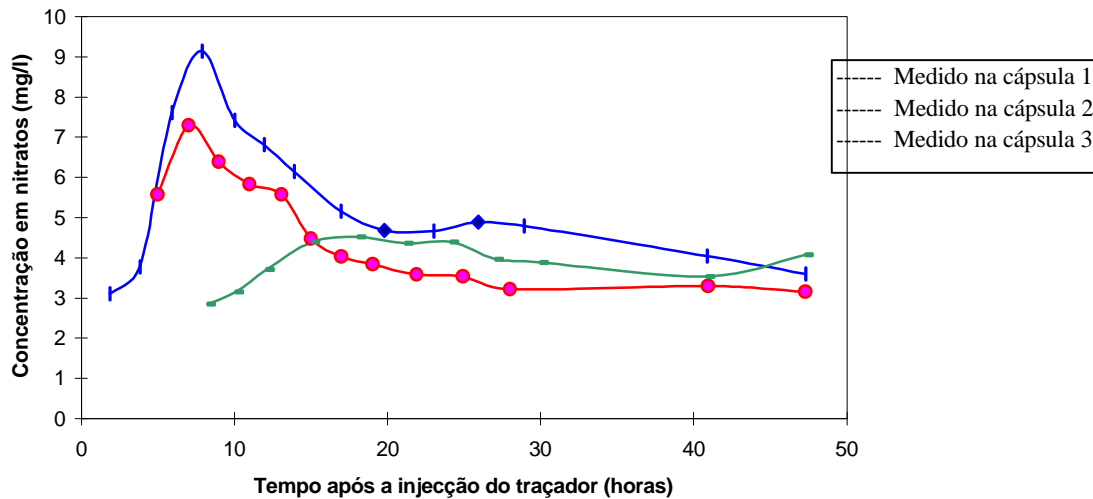


Figura 8 - Curvas Chegada de Nitratos às Três Cápsulas de Cerâmica

Relativamente aos resultados esperados, embora não fosse previsível o ajustamento das curvas (pelos motivos referidos na secção 5.2), existem algumas diferenças a considerar relativamente a dois aspectos: (1) tempo de chegada do pico de concentração e (2) valor máximo de concentração.

Como se pode observar da Figura 8, a chegada do pico do traçador é quase simultânea na cápsula 1 e 2, estando embora a cápsula 2 quase ao dobro da distância (C1 – 0,5 m; C2 – 0,9 m). Quanto à cápsula 3, a chegada do pico da concentração é idêntica à prevista.

Diversas hipóteses, ou uma combinação delas, podem ser responsáveis por este tipo de resultados:

- A existência de caminhos preferenciais, o que favorece a migração do traçador nas zonas de maior permeabilidade.
- A maior pressão negativa (sucção) nas zonas de menor saturação (ver Figura 7) pode aumentar localmente a velocidade.

Por outro lado, enquanto que os valores máximos de concentração registados para as cápsulas 1 e 2 são idênticos aos previstos, para a cápsula 3 este valor é pouco superior a metade do previsto. Este facto pode resultar de uma maior interacção química entre o traçador e a matriz envolvente, uma vez que o percurso atravessado é maior.

## 6 - CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos num ensaio de traçador, efectuado com nitratos, desenvolvido no âmbito de um estudo mais vasto sobre os processos de escoamento e de transporte na zona vadosa do solo.

Descreve-se um dos ensaios de traçador que permitiu quantificar os principais parâmetros que controlam o movimento dos nitratos, em profundidade, em condições de não-saturação.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Comissão Europeia, DGXII a contribuição financeira para o desenvolvimento do trabalho, no âmbito do contracto nº CI1-CT94-0014 (DG12 HSMU).

Agradece-se o suporte financeiro da União Europeia para a bolsa do Eng. Seán Quigley, no âmbito do programa *Leonardo*, através do UEPT TechWare, e, ainda, à Sociedade Agrícola de Yorkshire.

## BIBLIOGRAFIA

LEITÃO, T.E., LOBO FERREIRA, J.P.C. e VALOCCHI, A. – “Application of a Reactive Transport Model for Interpreting Non-Conservative Tracer Experiments. The Rio Maior Case-Study”. *Journal of Contaminant Hydrology*, **24** (1996), pp. 167-181.

LEITÃO, T.E., QUIGLEY, S. e LOBO FERREIRA, J.P.C. - *Experimental Investigation of Miscible Pollutant Transport in the Vadose Zone*. Relatório do segundo ano 15/97 - GIAS/DH, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997 a, 79 pp.

LEITÃO, T.E., QUIGLEY, S. e LOBO FERREIRA, J.P.C. - *Experimental Results on the Transport of Miscible Tracers in the Vadose Zone*. Relatório Intermédio entre o segundo e o terceiro ano - GIAS/DH, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997 b, 30 pp.