

SOLUÇÃO ANALÍTICA EM REGIME PERMANENTE PARA O FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DE UM FLUIDO NÃO AQUOSO LEVE – LNAPL

VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Maria Teresa Lajinha Ribeiro
Professora Auxiliar
Faculdade de Ciência e Tecnologia - UFP
tlajinha@ufp.pt

O caudal de extracção de água constitui uma das variáveis de decisão no projecto de recuperação de aquíferos contaminados por LNAPLs - Light Nonaqueous Phase Liquids .Neste trabalho, procura-se definir o modo como o caudal de água e o rebaixamento na captação se relacionam com o movimento do LNAPL e condicionam a sua espessura no final das operações de limpeza por bombagem. Desenvolvem-se equações para o sistema de fluxo bifásico saturado água/LNAPL, e constrói-se um modelo experimental que permite testá-las.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação da água subterrânea por derivados de petróleo ocorre maioritariamente na sequência de derrames acidentais e de fugas em oleodutos e tanques de armazenamento, constituindo um problema ambiental grave em resultado das propriedades físicas, da toxicidade e da persistência dos seus componentes, que possuem graus variáveis de solubilidade na água.

Os produtos petrolíferos pouco solúveis persistem numa fase separada, imiscível, quando em contacto com a água, conformando um sistema bi-fásico. Estes produtos são designados por "Nonaqueous Phase Liquids" ou NAPLs. Entre eles, distinguem-se os que possuem densidade superior à da água (referidos como "Dense Nonaqueous Phase Liquids" ou DNAPLs), dos que possuem densidade inferior à da água (referidos como "Light Nonaqueous Phase Liquids" ou LNAPLs).

Quando um NAPL é derramado na superfície do solo ou no meio subterrâneo, move-se por percolação na vertical sob a influência da gravidade, infiltrando-se na zona vadosa. (Fetter 1999) À medida que o processo de infiltração prossegue, uma fracção do volume derramado pode ficar retida por adesão às partículas do solo, formando acumulações globulares de NAPL no interior dos seus poros. Este tipo de acumulação pode, eventualmente, reduzir de tal modo o volume de LNAPL em circulação até ao ponto de impedir a progressão do seu movimento, restando uma massa difusa, adsorvida às partículas de solo, sob a forma de uma saturação residual em NAPL. Porém, nas situações em que as quantidades derramadas são pontualmente significativas ou a fonte de contaminação é contínua, a saturação residual pode ser excedida, e a massa de NAPL possui um movimento descendente contínuo até atingir o topo da franja capilar (Fetter, 1999; Marsily, 1986).

Os LNAPLs acumulam-se no topo da franja capilar, não conseguindo penetrar a zona saturada, formando uma "toalha" móvel à superfície do nível freático. Simultaneamente, alguns compostos solúveis podem dissolver-se na água, movendo-se com ela sob a forma de uma pluma de contaminação, enquanto os componentes voláteis ascendem em direcção à superfície do solo (Newell *et al.*, 1995). Devido às suas características tóxicas e à sua persistência, estes produtos, quando existentes no solo, devem ser removidos (Marsily, 1986).

Na actualidade existem várias tecnologias in situ para a remediação de aquíferos contaminados com NAPLs, nomeadamente, a "simples" bombagem e tratamento da água contaminada, a extracção com vapor ou com vácuo, a biodegradação e a utilização de surfactantes (acrónimo de "Surface Active Agents"). Porém, a remoção da fase livre de NAPL através de poços ou drenos, embora não extraíndo o contaminante que se encontra retido no solo ou

dissolvido na água, é sempre considerada um pré-requisito para a aplicação de qualquer outra tecnologia, reduzindo a mobilidade dos contaminantes imiscíveis e incrementando o seu potencial de transformação (Newell *et al.*, 1995).

A remoção do LNAPL dos aquíferos pode ser efectuada através de valas, drenos ou poços, onde se instalam equipamentos de bombagem que podem recuperar unicamente o LNAPL ou extrair água e LNAPL em simultâneo. A extracção em simultâneo da água e da película oleosa pode ser efectuada através de um único sistema de bombagem, que remove conjuntamente ambas as fases, ou utilizando sistemas de bombagem duplos, um para rebaixar o nível freático, induzindo o movimento da película oleosa sobrenadante, e outro que recupera unicamente o NAPL. A selecção de um método de extracção específico depende sobretudo da espessura, da extensão e da profundidade da película de LNAPL, e da permeabilidade e do gradiente hidráulico do aquífero (Newell *et al.*, 1995).

Quer seja utilizado um sistema de bombagem simples ou um sistema de bombagem duplo, o sucesso de um sistema de extracção de LNAPL com depressão da superfície freática depende do número de poços, da sua localização e da determinação dos caudais de bombagem, ou dos rebaixamentos, de água e de LNAPL. Estes factores constituem as variáveis de decisão principais no projecto de remediação de aquíferos contaminados por LNAPLs e, quando estabelecidos de forma apropriada, irão permitir a extracção de uma maior quantidade de LNAPL num intervalo de tempo menor e reduzir a extracção de água ao mínimo necessário. Neste trabalho estabelece-se uma série de equações que procuram definir o modo como o caudal de extracção de água e o rebaixamento imposto na captação se relacionam com o movimento da película de líquidos não aquosos leves e condicionam a sua espessura no final das operações de limpeza por bombagem.

2. EQUAÇÕES DE FLUXO BI-FÁSICO SATURADO

De modo a estimar algumas das variáveis de decisão referidas anteriormente é necessário estabelecer as equações que governam o movimento de dois fluidos imiscíveis (água e LNAPL) num meio poroso. Para tal, vão-se admitir as seguintes hipóteses simplificadoras:

- 1)** A película oleosa móvel consiste num estrato com a forma de um prisma rectangular apoiado sobre o nível freático;
- 2)** Segundo a vertical, o sistema aproxima-se quase instantaneamente do equilíbrio, ou seja, a redistribuição dos fluidos na vertical ocorre muito rapidamente (Cooper Jr *et al.*, 1998);
- 3)** Sob condições de equilíbrio vertical, a distribuição vertical de pressões pode ser caracterizada para todas as fases através da elevação de cada fluido, medida acima de uma superfí-

cie de referência (nível médio da água do mar), num poço de observação. Assim, considera-se uma superfície que limita superiormente o estrato móvel de LNAPL, h_p , onde a pressão do LNAPL é nula, e uma superfície que limita inferiormente esse estrato, h_{h2op} , para a qual as pressões do LNAPL e da água são iguais (Cooper Jr *et al.*, 1998).

4) Considera-se ainda uma terceira superfície, h_{h2o} , que corresponde ao nível piezométrico da água ou à interface hipotética ar/água na ausência do LNAPL. Esta nova superfície corresponde a uma correcção do nível da água medido num poço com LNAPL e reflecte o efeito confinante da lâmina oleosa sobre a superfície freática, assim h_{h2o} é definido por

$$h_{h2o} = h_{h2p} + \rho_p L_p \quad (1)$$

onde ρ_p é a densidade relativa (adimensional) do produto livre e L_p a espessura de produto medida no poço, dada por

$$L_p = h_p - h_{h2p} \quad (2)$$

5) Entre h_{h2op} e a base do aquífero os poros encontram-se completamente preenchidos por água pelo que, nesta zona, a saturação em água, S_{h2op} é de 100% (ou 1);

6) Entre h_p e h_{h2op} a saturação em LNAPL é de 100%.

Admitindo a validade destas hipóteses, a Lei de Darcy para o escoamento de fluidos imiscíveis num meio poroso é dada em notação vectorial por

$$U_f = -k \frac{k_f \rho_f}{\mu_f} \text{grad} h_f \quad (3)$$

onde f é o índice do fluido ($f=p$ para o LNAPL e $f=h2o$ para a água), k é o tensor permeabilidade intrínseca, k_f é a permeabilidade relativa do fluido, μ representa a viscosidade dinâmica, ρ a densidade e h_f a carga de água ou LNAPL.

A expressão (3) pode ser simplificada em

$$U_f = -K_f \text{grad} h_f \quad (4)$$

onde

$$K_f = k \frac{\rho_f}{\mu_f} \quad (5)$$

representa o tensor condutividade de cada fluido. Esta simplificação, obtida com $k_{rf}=1$, resulta da permeabilidade relativa ser um escalar variável entre 0 e 1, constituindo um parâmetro adicional na formulação da Lei de Darcy para escoamento de fluidos imiscíveis que é uma função da saturação do meio com o fluido f (Marsily, 1986; Huntley e Beckett, 2001). Admitindo que o movimento do LNAPL e da água se verifica preferencialmente sob condições de saturação em zonas perfeitamente delimitadas, embora contíguas, do aquífero (hipóteses 1), 2), 5) e 6)) admite-se a validade da expressão (4) da Lei de Darcy para o escoamento do LNAPL e da água.

De modo a descrever o fluxo bifásico num meio poroso torna-se ainda necessário formular a equação da continuidade para o escoamento de fluidos imiscíveis. Essa equação, admitindo que o fluxo ocorre unicamente segundo uma direcção paralela ao plano definido por x e y , (Hipótese de Dupuit), tem a forma geral

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{L_f} U_x \mathbf{d} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{L_f} U_y \mathbf{d} \right] = \omega_d \frac{\partial}{\partial t} \left[\int \mathbf{d} \right] \quad (6)$$

onde L_f representa a espessura do aquífero saturada com o fluido f e ω_d representa a porosidade de drenagem. O desenvolvimento da expressão (6), admitindo a homogeneidade das propriedades dos fluidos e do meio em relação à respectiva espessura saturada, em conjunto com a introdução da Lei de Darcy e de um termo de recarga ou descarga do fluido f no volume de fluxo, permite escrever

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_f L_f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_f L_f \frac{\partial h_f}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h_f}{\partial t} + Q_f \quad (7)$$

A expressão (7) conduz a um sistema de equações às derivadas parciais que, para o fluxo de LNAPL e de água e assumindo a validade das hipóteses 3) e 4) estabelecidas anteriormente, toma a forma:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{h2o} L_{h2o} \frac{\partial h_{h2o}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{h2o} L_{h2o} \frac{\partial h_{h2o}}{\partial y} \right) &= \omega_d \frac{\partial h_{h2o}}{\partial t} + Q_{h2o} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_p L_p \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_p L_p \frac{\partial h_p}{\partial y} \right) &= \omega_d \frac{\partial h_p}{\partial t} + Q_p \end{aligned} \right. \quad (8)$$

onde L_{h2o} representa a espessura saturada com água, definida em cada instante pela diferença entre h_{h2o} e a base impermeável do aquífero, e L_p representa a espessura saturada com produto livre ($L_p = h_p - h_{h2op}$).

3. MODELO ANALÍTICO SIMPLIFICADO PARA O FLUXO DO LNAPL

Admitindo as hipóteses referidas na secção anterior e considerando películas de óleo com pouca espessura (onde $h_{h2o} \cong h_{h2op}$) é possível resolver analiticamente o sistema de equações que descreve o fluxo bifásico num aquífero contaminado por LNAPLs (expressão 8) em regime permanente.

Considerando um regime estacionário do fluxo, a primeira equação desse sistema é resolvida analiticamente pela Equação de Dupuit-Thiem, para aquíferos confinados homogéneos, isotrópicos e de base horizontal, ou pela Equação de Dupuit-Forchheimer, para aquíferos livres (homogéneos, isotrópicos e de base horizontal). A resolução da segunda equação é algo mais problemática já que, enquanto o fluxo da água subterrânea ocorre independentemente do fluxo da película oleosa, o contrário não se verifica. Assim, a segunda equação possui uma solução que é função da solução da primeira equação do sistema.

De forma a estabelecer a relação que existe entre o escoamento da água subterrânea e o escoamento do LNAPL pode, em particular, admitir-se que para películas oleosas com pouca espessura a velocidade do LNAPL é função do gradiente hidráulico e, a partir desta conjectura, formular um conjunto de equações que descrevem o movimento da película de LNAPL.

Considere-se então um aquífero contaminado com uma fina camada de LNAPL onde se admite a validade da Equação de Dupuit-Forchheimer como solução da primeira equação do sistema dado na expressão (8).

$$h^2(r) - H^2 = \frac{Q}{K\pi} \ln \frac{r}{R} \quad (9)$$

Onde $h(r)$ representa a carga hidráulica a uma distância r da captação, H representa a carga hidráulica a uma distância R da captação ($R \rightarrow r$) e Q é o caudal na captação.

Resolvendo a Equação de Dupuit-Forchheimer em ordem a h_{h2o}^2 e derivando em ordem a r obtém-se

$$\frac{dh_{h2o}}{dr} = \frac{Q_{h2o}}{2\pi K_{h2o} h_{h2o} r} \quad (10)$$

e como

$$h_{h2o} = \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2}$$

, por substituição na expressão (10) anterior tem-se

$$\frac{dh_{h2o}}{dr} = \frac{Q_{h2o}}{2\pi K_{h2o} r \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2}} \quad (11)$$

Substituindo a expressão (11) na Lei de Darcy, obtém-se a velocidade, U_p , do LNAPL num ponto situado à distância r de uma captação num aquífero livre:

$$U_p = K_p \frac{Q_{h2o}}{2\pi K_{h2o} r \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2}} \quad (12)$$

O caudal de LNAPL, Q_p , que circula num cilindro centrado na captação de raio igual ao seu raio de influência, considerando

$$\left(\frac{dh_{h2o}}{dr} \right)_{r=R}$$

, recorrendo à lei de Darcy, será então dado por

$$Q_p = K_p 2\pi R \frac{Q_{h2o}}{2\pi K_{h2o} R \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2}} = K_p L_p \frac{Q_{h2o}}{K_{h2o} H_{h2o}} \quad (13)$$

Sabendo que para fluxo estacionário o caudal permanece constante, num ponto à distância r da captação tem-se

$$L_p(r) \frac{K_p}{K_{h2o}} \frac{Q_{h2o}}{\sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2}} = K_p L_p \frac{Q_{h2o}}{K_{h2o} H_{h2o}} = Q_p \quad (14)$$

Se agora se resolver a expressão (13) em ordem a $L_p(r)$ obtém-se

$$L_p(r) = \frac{L_p}{H_{h2o}} \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2} \quad (15)$$

ou

$$L_p(r) = \frac{Q_p K_{h2o}}{Q_{h2o} K_p} \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} \ln \frac{r}{R} + H_{h2o}^2} \quad (16)$$

pelo que, ao considerar admissível a Equação de Dupuit-Forchheimer para resolver a primeira equação do sistema de fluxo bifásico (expressão (8)), a solução da segunda equação desse sistema, $h_p(r)$, será dada por

$$h_p(r) = h_{h2o}(r) + (1 - \rho_p) \frac{L_p}{H_{h2o}} \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} h \frac{r}{R} + H_{h2o}^2} \quad (17)$$

ou por

$$h_p(r) = h_{h2o}(r) + (1 - \rho_p) \frac{Q_p K_{h2o}}{Q_{h2o} K_p} \sqrt{\frac{Q_{h2o}}{\pi K_{h2o}} h \frac{r}{R} + H_{h2o}^2} \quad (18)$$

4. ALGORITMO ADAPTADO AO MODELO SIMPLIFICADO DE PREVISÃO

Com o objectivo de aplicar de uma forma expedita os conceitos subjacentes à formulação do modelo analítico proposto, desenvolveu-se em MATLAB um algoritmo de cálculo automático, o algoritmo SALIRPLNAPL (acrónimo de Solução Analítica para Aquífero Livre em Regime Permanente com LNAPL). O algoritmo recorre aos conceitos estabelecidos através das expressões (10) a (18) para simular o fluxo radial simétrico e estacionário que ocorre em torno de uma captação que extrai água e LNAPL. O caudal de água para um dado valor pretendido do rebaixamento, Δh , é calculado através da resolução em ordem a Q da expressão:

$$(H + \Delta h(r))^2 - H^2 = 2H\Delta h(r) + \Delta h^2(r) = \frac{Q}{\pi K} h \frac{r}{R} \quad (19)$$

A carga hidráulica para esse caudal na captação é calculada através da expressão de Dupuit - Forchheimer, resolvida em ordem a h .

5. MODELO EXPERIMENTAL DE FLUIDOS IMISCÍVEIS DE PERCOLAÇÃO

O modelo analítico simplificado proposto para um sistema de fluxo bi-fásico água/LNAPL foi deduzido a partir da Equação de Dupuit-Forchheimer. Uma vez que esta equação possui uma solução analítica exacta para o caso de uma captação localizada no centro de uma ilha circular, o modelo experimental simula um domínio espacial de fluxo com estas características.

O suporte estrutural do modelo é constituído por uma caixa quadrangular de aço com 150 cm de lado e 50 cm de altura, destinada a conter o "mar", em cujo centro se colocou um cilindro perfurado e sem bases, com 113,4 cm de diâmetro e 37 cm de altura, também construído em aço e envolvido lateralmente e na base por uma rede plástica de malha fina, que serviu de estrutura de construção da "ilha".

A estrutura cilíndrica foi preenchida com uma camada uniforme de areia comercial previamente lavada para extrair as partículas mais finas, permitindo simular uma ilha circular com 113,4 cm de diâmetro e cerca de 34 cm de espessura permeável. No centro desta ilha instalou-se uma captação de secção circular construída em tubo plástico perfurado com 2,5 cm de diâmetro interior. A 14,2 cm de distância da captação (distância entre eixos) instalou-se um piezómetro com 69,5 cm de comprimento, construído em tubo plástico perfurado ao longo de 31 cm, a partir de 4 cm da base, cuja secção circular tem a mesma dimensão interior que a da captação. Tanto o piezómetro como a captação penetram completamente a espessura permeável da ilha.

O piezómetro foi construído de modo a possibilitar a aquisição de dados relativos à posição das interfaces água/LNAPL e LNAPL/ar, tendo esta detecção sido conseguida através de fibras ópticas.

As fibras, com 0,75 mm de espessura, foram inseridas em pequenos furos espaçados de 2 mm, efectuados ao longo de 100 mm do comprimento do tubo, localizando-se a primeira fibra a 20,9 cm da base do piezómetro e a última a 30,9 cm. O conjunto de fibras foi recolhido ao longo da face exterior do piezómetro e redistribuído, ordenadamente, ao longo de furos realizados numa placa acrílica acoplada ao topo do piezómetro, de modo que, a localização das fibras nesta placa tem correspondência com o local do piezómetro onde foram inseridas.

De modo a localizar as interfaces entre os vários fluidos durante as experiências insere-se uma fonte luminosa no interior do piezómetro. A fonte luminosa é constituída por uma série de pequenas lâmpadas protegidas por um tubo de vidro, permitindo identificar, por diferenciação cromática, a posição em profundidade das interfaces entre os fluidos que se pretendam localizar. Sendo assim, foi necessário corar a água com rodamina, conferindo à fase aquosa uma intensa coloração rosada. Após a construção da "ilha" simulou-se o mar que a rodeia, enchendo-se com água o contentor quadrangular que a contém. Obtendo-se, assim, um sistema aquífero em equilíbrio.

5.1. DETERMINAÇÃO DOS CAUDAIS

De modo a identificar a correspondência entre a regulação, em R.P.M., da bomba peristáltica utilizada nas experiências e o caudal de água, em m^3 por segundo, que é extraído a partir do fundo da captação, foram efectuados três ensaios de bombagem a partir das condições iniciais em equilíbrio do sistema. Cada um dos ensaios correspondeu a uma regulação fixa na bomba e, para cada uma das regulações consideradas, mediu-se o volume de água extraído ao longo do tempo. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Correspondência entre os caudais de água extraídos a partir do fundo do poço e a regulação seleccionada na bomba peristáltica

Regulação da Bomba (RPM)	Duração do ensaio (min.)	Volume extraído (l)	Caudal (m ³ /s)
50	2	4	3,3(3)x10 ⁻⁵
75	2	6	5x10 ⁻⁵
100	1	4	6,6(6)x10 ⁻⁵

5.2. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica média, K , do modelo experimental foi determinada através da realização de cinco experiências de bombagem com caudal imposto, efectuadas a partir das condições iniciais em equilíbrio do sistema. As únicas fases presentes no sistema durante estas experiências foram água e ar.

As experiências consistiram em extrair água a partir do fundo da captação, com recirculação contínua do volume extraído para o "mar" que a rodeia, tendo-se medido, em condições de regime permanente de fluxo, o nível sub superficial da água num ponto do cone de rebaixamento correspondente à localização do piezómetro na "ilha" e o nível da superfície livre de água circundante.

As medições do nível da água do "mar" foram efectuadas com um nónio digital, medindo-se a distância entre a borda superior do cilindro metálico que contém o meio poroso e a superfície da água. A subtração entre os valores obtidos e a altura do cilindro metálico permitiram determinar a carga hidráulica na fronteira do domínio espacial de fluxo, utilizando como referencial a base do sistema experimental. As leituras do nível da água no piezómetro foram efectuadas, em cada uma das experiências, por destrição das cores branco e rosa na extremidade emissora de luz das fibras ópticas.

Tabela 2 Condições em regime permanente em cada uma das experiências que serviram de base à determinação da condutividade hidráulica

Experiência Nº	Q (m ³ /s)	h (m)	H (m)	K (m/s)
1	3,33x10 ⁻⁵	0,2619	0,27424	2,22x10 ⁻³
2	5x10 ⁻⁵	0,2539	0,2761	1,88x10 ⁻³
3	6,66x10 ⁻⁵	0,2479	0,2787	1,81x10 ⁻³
4	6,66x10 ⁻⁵	0,2479	0,27479	2,09x10 ⁻³
5	6,66x10 ⁻⁵	0,2399	0,269	1,98x10 ⁻³

Através dos valores, em regime permanente, da carga hidráulica no piezómetro, h , do nível da superfície de água livre, H , e do caudal de água, Q , imposto na captação em cada uma das cinco experiências realizadas (Tabela 2) foi possível determinar, recorrendo à Equação de Dupuit-Forchheimer, a condutividade hidráulica do meio poroso que constitui a ilha experimental obtendo-se os valores dados na última coluna da Tabela 2, de onde se concluiu que o valor médio da condutividade hidráulica no modelo experimental é de $1,996 \times 10^{-3}$ m/s.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO LNAPL UTILIZADO NO MODELO EXPERIMENTAL

Após a determinação da condutividade hidráulica lançou-se no sistema aquífero experimental, com a bomba regulada a 50 R.P.M., 35×10^{-3} m³ de um líquido não aquoso, de densidade inferior à da água, constituído por uma mistura de 10 litros de petróleo de iluminação, 15 litros de óleo queimado de motor, 5 litros de óleo lubrificante e 5 litros de hidrocarbonetos líquidos, imiscíveis na água, extraídos da sub-superfície da Refinaria da Petrogal.

A densidade do LNAPL conformado pela mistura, é de 0,82 e a sua viscosidade dinâmica, à temperatura ambiente, é de 2,6 cP (centipoise) ou $2,6 \times 10^{-3}$ Pa s (pascal segundo). Estas determinações foram efectuadas em laboratório.

Conhecidos os valores da densidade e da viscosidade dinâmica da fase não aquosa e da condutividade hidráulica média do meio poroso, foi possível determinar, recorrendo à expressão 5, a condutividade do LNAPL nesse meio.

$$K_p = 1,996 \times 10^{-3} \frac{0,8}{2,6} \cong 6,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

6. COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS OBTIDOS NO MODELO EXPERIMENTAL E OS RESULTADOS DO MODELO ANALÍTICO

A partir do momento em que se verificou, por introdução de uma vareta, que existia LNAPL no interior da captação, a bombagem deixou de ser efectuada a partir do fundo do poço, posicionando-se a boca da mangueira de extracção da bomba peristáltica (sem nunca a desligar ou proceder a uma nova regulação) a uma dada distância do fundo da captação, de modo a efectuar a extracção em simultâneo da água e do LNAPL, com recirculação para o mar experimental dos fluidos extraídos.

Em regime estacionário do fluxo bi-fásico água e LNAPL, determinou-se aproximadamente o nível do fluído no interior da captação, por introdução de um tubo plástico, e registou-se o nível das interfaces água/LNAPL e LNAPL/ar no piezómetro de fibras ópticas, através da contagem do número de fibras que emitem diferentes tons luminosos, utilizando como referencial a base da "ilha". Mediu-se também a espessura do LNAPL que flutuava sobre a superfície do mar experimental, tendo-se determinado nesse local a posição da interface LNAPL/ar em relação à base da ilha experimental, através da medição, com um nóvio digital, da distância entre a borda superior do cilindro metálico que contém o meio poroso e a superfície livre do LNAPL.

Os dados obtidos no modelo experimental, relativos à espessura do LNAPL, L_p , e à posição das interfaces água/LNAPL, h_{h2op} , e LNAPL/ar, h_p , no piezómetro, e à carga hidráulica, h_{h2o} , na captação, medidas em relação à base da "ilha", constam da Tabela 4.

Tabela 3 Dados obtidos no modelo experimental para o fluxo bi-fásico em regime permanente de água e LNAPL

Local de medida	L_p (m)	h_{h2op} (m)	h_p (m)	h_{h2o} (m)
Mar Experimental	0,01	0,23878	0,24878	nd
Piezómetro	0,009[*]	0,23144	0,24044[*]	nd
Captação	nd	nd	nd	0,225[*]

[*] Valor aproximado nd – não determinado

De modo a comparar os dados obtidos no modelo experimental com os resultados do modelo matemático (implementado através do algoritmo de cálculo automático SALIRPL-NAPL), introduziram-se nesse algoritmo os valores correspondentes às determinações experimentais da condutividade hidráulica e da condutividade e densidade do LNAPL. Adicionalmente, em conformidade com as condições em que foram obtidos os dados relativos ao fluxo da água e do LNAPL no modelo experimental, os valores admitidos nos algoritmos para a espessura inicial saturada com LNAPL e para a carga hidráulica inicial correspondem aos respectivos valores determinados no mar experimental (fronteira do modelo). O valor considerado nos algoritmos para o rebaixamento imposto na captação foi obtido por subtração entre os valores da carga hidráulica determinados na fronteira e na captação do modelo experimental.

Na Tabela 4 apresentam-se de forma resumida os valores dos parâmetros hidrogeológicos e de controlo, em conjunto com as condições iniciais, admitidos no algoritmo SALIRPLNAPL com o objectivo de simular as condições do fluxo bifásico existente no modelo experimental.

Tabela 4 Valores dos "inputs" considerados no algoritmo SALIRPLNAPL

Designação	Descrição	Valor
n	Número de captções	1
nx	Número de malhas segundo x da grelha	35
ny	Número de malhas segundo y da grelha	35
dx	Dimensão das malhas segundo x	0,0344 m
dy	Dimensão das malhas segundo y	0,0344 m
x	Localização da captação segundo x da grelha	0,602
Y	Localização da captação segundo y da grelha	0,602
Rl	Raio de influência da captação	0,5676 m
K	Condutividade hidráulica	$3,06 \times 10^{-3}$ m/s [1]
Kp	Condutividade do LNAPL	$6,3 \times 10^{-4}$ m/s
pp	Densidade do LNAPL	0,82 g/cm ³
Hinicial	Carga hidráulica inicial	0,24698 m
Lp0	Espessura inicial uniforme da película de LNAPL	0,01m
sd	Rebaixamento desejado na captação	-0,02198m

[1] Valor da condutividade hidráulica calculado para a água salgada que existe no modelo experimental em consequência da experiência relativa à determinação da porosidade cinemática

Os valores das variáveis carga hidráulica, espessura de LNAPL e altura piezométrica do LNAPL calculados pelo algoritmo analítico SALIRPLANPL na malha correspondente ao local do piezómetro, em conjunto com os respectivos valores obtidos no modelo experimental, são dados na Tabela 5.

Tabela 5 Confrontação entre os resultados obtidos pelo algoritmo SALIRPLNAPL para a espessura do LNAPL e para as interfaces água/LNAPL e LNAPL/ar no piezómetro e os respectivos valores obtidos no modelo experimental

	Experimental	Calculado por SALIRPLNAPL(1)	Desvio entre o valor experimental e o valor calculado por SALIRPLNAPL(mm)
hp (m)	0,24044	0,2401	0,34
Lp (m)	0,009	0,0096	<-1
hh2op (m)	0,23144	0,2304	1,04

[1] Na malha (i,j)=(22,18), cujo centro dista 0.1376 m do centro da malha que contém a captação.

Na Tabela 5 apresentam-se também os valores absolutos dos desvios entre os dados obtidos no modelo experimental e as previsões do modelo analítico.

7. CONCLUSÕES

Verificou-se que os desvios entre os valores observados no piezômetro do modelo experimental e os valores previstos pelo modelo matemático são inferiores a 10%, ocorrendo por defeito, em relação aos respectivos valores experimentais, para os valores calculados por SALIRPLNAPL [excepto para a espessura do LNAPL].

Em relação à espessura do LNAPL na captação, a previsão dada pelo modelo analítico fornece valores superiores aos que parecem verificar-se na prática (a extracção do LNAPL na captação do modelo experimental é efectuada sob a forma de pequenas gotas emulsionadas com a água, indicando que existe pouca acumulação de LNAPL na captação), sendo assim, o modelo matemático proposto forneceria uma previsão pessimista acerca da espessura final do LNAPL na vizinhança da captação, o que permitiria obter estimativas por excesso dos custos de bombagem associados à limpeza do aquífero.

As soluções analíticas estabelecidas, e a sua posterior verificação experimental, permitiram fundamentar uma ideia intuitiva geralmente aceite na resolução dos problemas relacionados com a contaminação da água subterrânea por produtos petrolíferos sobrenadantes. Esta ideia consiste em assumir que o gradiente hidráulico imposto em torno de uma captação condiciona o movimento do LNAPL para o seu interior, sendo que a comparação entre os resultados obtidos através do algoritmo de cálculo automático que implementa as soluções propostas, e os dados obtidos no modelo experimental de percolação de fluidos imiscíveis, não permitiram a sua refutação.

Embora se conheçam as limitações dos modelos analíticos, nomeadamente, a assunção de homogeneidade dos parâmetros envolvidos e a simplicidade dos domínios espaciais por eles admitidos, estes modelos têm a grande vantagem de fornecer soluções expeditas para os problemas, sem que haja necessidade de se proceder à recolha exaustiva de dados responsável pela morosidade e encarecimento dos projectos deste tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cooper Jr, G. S., Peralta, R. C. and Kaluarachchi, J. J. (1998) Optimizing separate phase light hydrocarbon recovery from contaminated unconfined aquifers. *In Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 21, pp. 339 – 350.

Fetter, C. W. (1999) *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall.

Huntley, D. and Beckett, G. D. (2001) *Evaluating Hydrocarbon Removal from Source Zones: Tools to Assess Concentration Reduction*. The American Petroleum Institute.

Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press

Newell, C.J., Acree, S. D., Ross, R.R., Huling, S.G. (1995) *Light Nonaqueous Phase Liquids*. EPA Ground Water Issue