

74376 - ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA DE CONTAMINANTES EM SOLO A PARTIR DE VAZAMENTO EM LAGOA DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Fabiana Pimentel Macêdo Farias¹, Ana Carla da Fonseca Ferreira², Andreza Larissa Pires Morais^{2}*

¹Doutora e professora da Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento (UATEC), Universidade Federal de Campina Grande, Sumé –PB, 58540-000, e-mail: fabianapimentel@ufcg.edu.br

²Graduanda do curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos, Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos – UAEB, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé –PB, 58540-000, e-mail: ferreirafc.ana@gmail.com

^{2} Graduanda do curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos, Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos – UAEB, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé –PB, 58540-000, e-mail: laryramirez64@gmail.com*

RESUMO: As lagoas de tratamento de esgoto são unidades construídas com o intuito de promover o tratamento de efluentes domésticos e/ou industriais por meio da atuação de microrganismos naturalmente presentes no meio. Devido à grande quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos presentes, bem como de metais pesados, estas constituem-se como uma das principais fontes de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Neste sentido, o presente trabalho objetiva simular numericamente o comportamento fluidodinâmico da pluma de contaminante de cobre (Cu) proveniente de vazamento em lagoa de tratamento de esgoto, através do emprego do pacote comercial ANSYS CFX 15.0. As equações de conservação de massa, momento linear e transferência de matéria foram resolvidas simultaneamente através do modelo de escoamento monofásico e multicomponente disponível no ANSYS CFX[®] 15, considerando um domínio poroso bidimensional, com propriedades constantes e distribuídas uniformemente. Os resultados numéricos indicam que o comportamento da pluma do contaminante é influenciado pela velocidade da água escoando horizontalmente no meio poroso e pela permeabilidade do meio poroso.

Palavras-chave: Lagoas de tratamento; metais pesados; águas subterrâneas

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE PLUME OF CONTAMINANTS IN SOIL FROM LEAKAGE IN LAGOON OF TREATMENT OF SEWAGE

ABSTRACT: Lagoon of treatment of sewage are units built with the purpose of promoting the treatment of domestic and / or industrial effluents through the performance of microorganisms naturally present in the environment. Due to the large amount of organic and inorganic compounds present, as well as heavy metals, these are one of the main sources of contamination of soil and groundwater. In this sense, the present work aims to numerically simulate the fluid dynamics behavior of the copper contaminant plume (Cu) from the sewage treatment pond by using the ANSYS CFX 15.0 commercial package. Mass conservation, linear momentum and transfer of matter equations were simultaneously solved by adoption of monophasic and multi-component outflow, using the software *ANSYS CFX*[®] 15, considering a two-dimensional porous medium and with constant and uniformly distributed properties. Numerical results indicate that the behavior of the plume of contaminant is influenced by the speed of the water horizontally outflowing in a porous medium, and the permeability of the porous medium.

Keywords: Lagoon of treatment; heavy metals; groundwater

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a sociedade vem se defrontando com uma série de problemas globais, sobretudo ambientais, econômicos, sociais e de mercado. Neste quadro, as preocupações com o meio ambiente e com a água, em particular, adquirem especial importância, pois as demandas estão se tornando cada vez maiores, sob o impacto do crescimento acelerado da população e do maior uso da água, imposto pelos padrões de conforto e bem-estar da vida moderna. Entretanto, a qualidade das águas, dos ecossistemas e da vida, em geral, vem sendo degradada de uma maneira alarmante, e esse processo logo pode ser irreversível (1).

Com a crescente contaminação das águas superficiais, as reservas subterrâneas passaram a exercer um importante papel como fonte de abastecimento, em virtude da abundância e qualidade de água doce. Apesar da extrema importância dos aquíferos, estes estão sendo contaminados com o uso abusivo de agrotóxicos e fertilizantes (provenientes da agricultura), fossas sépticas, aterros sanitários, depósitos

subterrâneos de produtos químicos e combustíveis, bem como lagoas de tratamento de esgotos (2).

Uma das principais causas de contaminação destas águas decorre de vazamentos em lagoas de tratamento de esgoto. Estas, por sua vez, são unidades construídas com a finalidade de tratar efluentes domésticos e/ou industriais, por meio da ação de microrganismos naturalmente presentes no meio, estando o solo devidamente compactado para evitar a infiltração de contaminantes e conseqüentemente, a contaminação das águas subterrâneas (3).

Em geral, nos efluentes domésticos e industriais podem ser encontrados inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos, nutrientes e microrganismos, alguns de difícil remoção, como os metais pesados. Estes, por sua vez, constituem uma ameaça à saúde humana devido aos seus impactos na qualidade da água, dos alimentos e dos ecossistemas.

O conhecimento de como ocorre o avanço dos contaminantes no solo, se estes atingirão ou não o lençol freático, em quanto tempo e em que concentração, além do entendimento de como as características do solo (porosidade e permeabilidade) influenciam nesse avanço, são de extrema importância para se conhecer a extensão do dano ambiental e, assim, adotar medidas de remediação mais adequadas para minimizar o problema.

Neste sentido, a fluidodinâmica computacional aliada ao conhecimento dos mecanismos de transporte dos contaminantes no solo (difusão, advecção e dispersão) e ao grau de saturação, passa a ser uma ferramenta importantíssima para fornecer informações que poderão auxiliar numa estimativa do prejuízo ambiental causado pelo vazamento da lagoa de tratamento de esgoto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI), da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, da UFCG, que dispõe dos pacotes comerciais ANSYS CFX® 15.0 e ICEM-CFD® 15.0, onde foram realizadas as simulações.

Descrição do problema

O domínio de estudo referente a lagoa de tratamento de esgoto foi baseado no trabalho de (4), com dimensões de 200m x 20m, conforme a Figura 1.

O contaminante estudado foi o cobre, por ser um poluente associado a graves problemas ambientais (perda da biodiversidade e contaminação dos aquíferos) e de saúde pública (em excesso, pode estar relacionado a danos celulares).

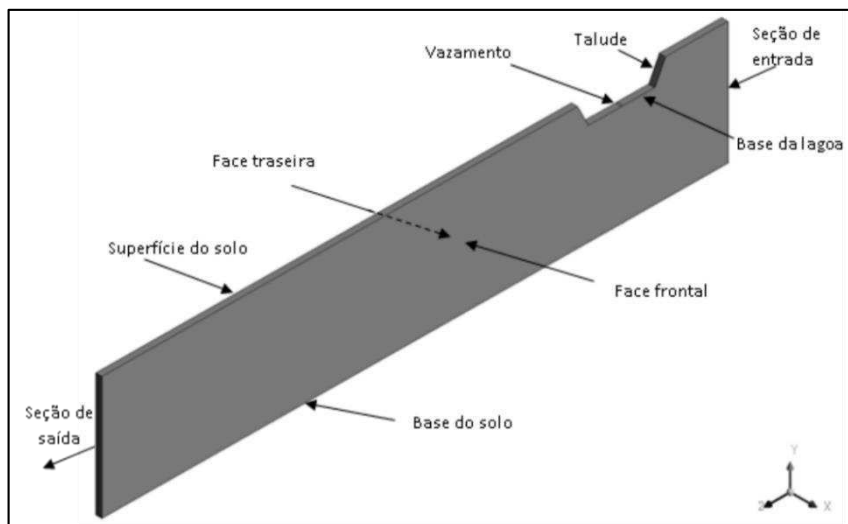


Figura 1 - Geometria final do domínio computacional estudado (5).

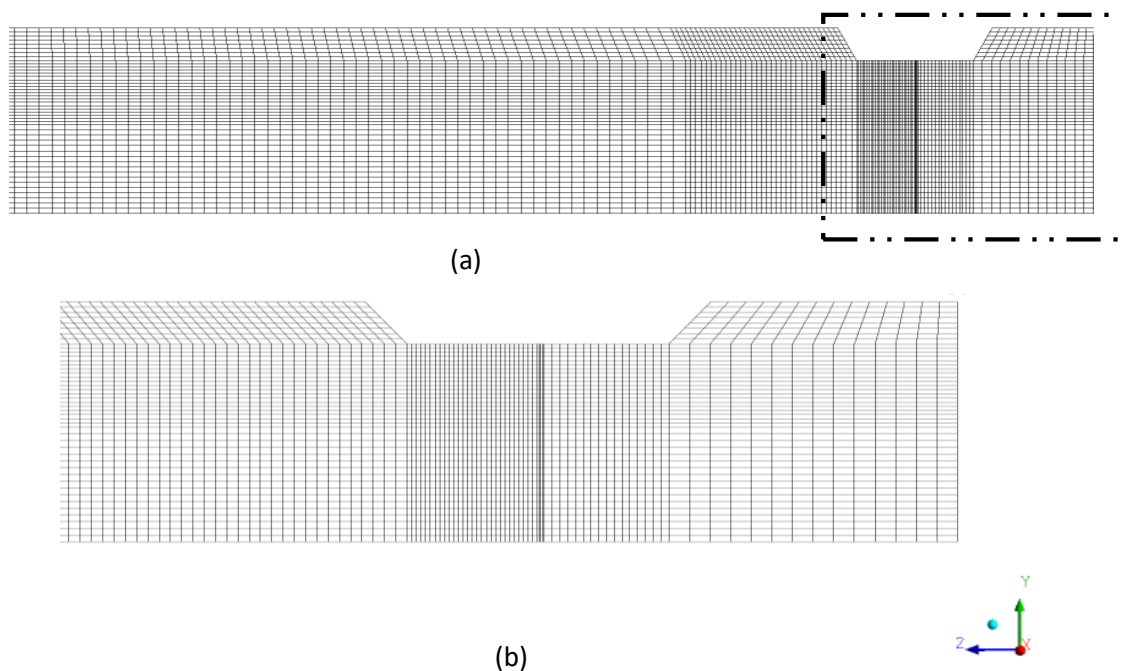


Figura 2 - Malha numérica de simulação: (a) visão geral e (b) detalhe da região da lagoa de tratamento de esgoto (5).

Modelagem Matemática

Para estudar o comportamento da pluma de contaminantes em solo saturado, adotou-se o modelo de escoamento monofásico e multicomponente, baseado nas equações de conservação de massa, momento linear e de transferência de massa. Foram adotadas as seguintes considerações:

- Escoamento em regime laminar e transiente;
- Fluido incompressível (água) com propriedades físico-químicas constantes;
- O meio poroso (solo) foi considerado isotrópico (porosidade e permeabilidade constantes);
- Não há reação química.

Com base nas considerações feitas, as equações de conservação podem ser escritas como sendo:

- Equação de conservação de massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho\gamma) + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{K} \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

- Equação de momento linear

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho\vec{V}) + \nabla \cdot \rho \cdot (\mathbf{K} \cdot \vec{V}) \otimes \vec{V} - \nabla \cdot (\mu_e \cdot \mathbf{K} (\nabla\vec{V} + (\nabla\vec{V})^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot \vec{V})) = \Phi S_M - \Phi \nabla P \quad (2)$$

Onde: ϕ é a porosidade, \vec{V} é o vetor velocidade, ρ é a densidade, \mathbf{K} é o tensor permeabilidade, μ_e é a viscosidade efetiva, S_M é uma fonte de momento (representa uma resistência ao escoamento no meio poroso) e P é a pressão.

- Equação da transferência de massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho\mathbf{Y}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{K} \cdot u\mathbf{Y}) = \nabla \cdot (D_{AB} \mathbf{K} \cdot \nabla \mathbf{Y}) \quad (3)$$

Onde \mathbf{Y} é a fração mássica dos componentes, D_{AB} é a difusividade da espécie A no solvente B.

Condições Iniciais e de Contorno

O domínio de estudo (meio poroso) foi inicialmente considerado saturado com água, ou seja, fração mássica de água (f_w) é igual a 1.

Adotou-se as seguintes condições de contorno:

Na seção de entrada	$w = u_z$ (Quadro 1) $f_w = 1 ; f_{Cu} = 0$
Na saída	$\frac{\partial u}{\partial x_i} = \frac{\partial v}{\partial x_i} = 0 \quad i = x, y$
Velocidade do vazamento	$v = u_y$ (Quadro 1) $f_w = 0 ; f_{Cu} = 1$
Na base da lagoa e taludes; Superfície e base do solo (meio poroso)	Condição de não-deslizamento $v = w = 0$
Faces frontal e traseira*	Condição de simetria $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

Onde u , v e w correspondem, respectivamente, aos componentes de velocidade nas direções x , y e z .

As propriedades físico-químicas da água e do cobre estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A densidade da água ($\rho_{\text{água}}$) e do cobre (ρ_{Cu}) foram baseados nos valores informados por (6). O coeficiente de difusão do cobre (D_{Cu}) foi retirado dos estudos de (4).

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da água 25 °C e 1 atm (5)

Densidade, ρ (kg/m ³)	997,0
Viscosidade dinâmica, μ (cP)	0,891

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do cobre 25 °C e 1 atm (5)

Densidade, ρ (kg/m ³)	8933
Coefficiente de difusão, D (cm ² /s)	5,21 x 10 ⁻⁵

A porosidade do meio poroso foi adotada constante e igual a 0,3 e as permeabilidades (K) são apresentadas na Tabela 3.

No Quadro 1 são apresentados os casos avaliados, onde foram alterados os valores da permeabilidade, K, do meio poroso (solo) e os valores da velocidade de entrada lateral de água (u_z).

Quadro 1 – Casos estudados (5)

Casos	u_y (cm/s)	u_z (cm/s)	K (m ²)
1	1x10 ⁻⁴	1	10 ⁻¹⁰
2	1x10 ⁻⁴	1	10 ⁻¹¹
3	1x10 ⁻⁴	1	10 ⁻¹²
4	1x10 ⁻⁴	0	10 ⁻¹⁰
5	1x10 ⁻⁴	2	10 ⁻¹⁰
6	1x10 ⁻⁴	4	10 ⁻¹⁰

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 está representado o comportamento da pluma de contaminante (Cobre) no tempo final considerado (100 h) sobre o plano longitudinal YZ, para três permeabilidades 1x10⁻¹⁰, 1x10⁻¹¹ e 1x10⁻¹² m², Figuras 3 (a), 3 (b) e 3 (c), respectivamente. Nota-se que o comportamento da pluma de contaminante é fortemente influenciada pela redução da permeabilidade. A pluma tende a se difundir no solo a jusante da lagoa de tratamento de esgoto, próximo a superfície (Figuras 3 (b) e (c)). Esta tendência é explicada pela alta resistência que o solo oferece, nas condições avaliadas.



(a)



(b)



(c)

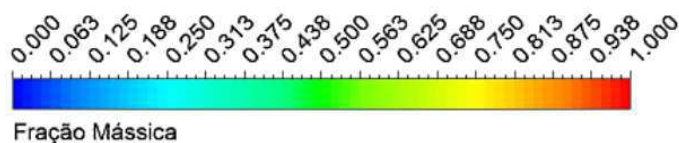


Figura 3. Dispersão do contaminante cobre (Cu) em 100h para diferentes permeabilidades. (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3. (5).

Em termos comparativos, por exemplo, uma permeabilidade na ordem de 10^{-12} corresponderia a uma rocha selante, a exemplo do granito, e para ordem de 10^{-10} m^2 seria rochas calcárias. Neste último caso, a resistência oferecida é 100 vezes menor o que facilita o escoamento da água e do contaminante no solo. Nota-se que a dispersão mecânica é dominante e para permeabilidades de ordem de 10^{-12} m^2 o fenômeno de difusão domina, ou seja, o mecanismo de espalhamento do poluente ou contaminante é praticamente por difusão.

A Figura 4 apresenta a evolução da distribuição de fração mássica de contaminante (cobre) a partir do vazamento na lagoa de tratamento de esgoto sobre o

plano longitudinal YZ, para três velocidades de entrada, 0, 1, 2 e 4 cm/s, em tempos de 100 h, através das Figuras 4 (a), 4 (b), 4 (c) e 4 (d), respectivamente. Nota-se claramente a influência da velocidade de entrada de água sobre o comportamento da pluma. A medida que se aumenta esta velocidade, ocorre o deslocamento da pluma horizontalmente (na direção z), fazendo com que a mesma atinja distâncias maiores no solo, mas por outro lado demora a atingir a base do solo.

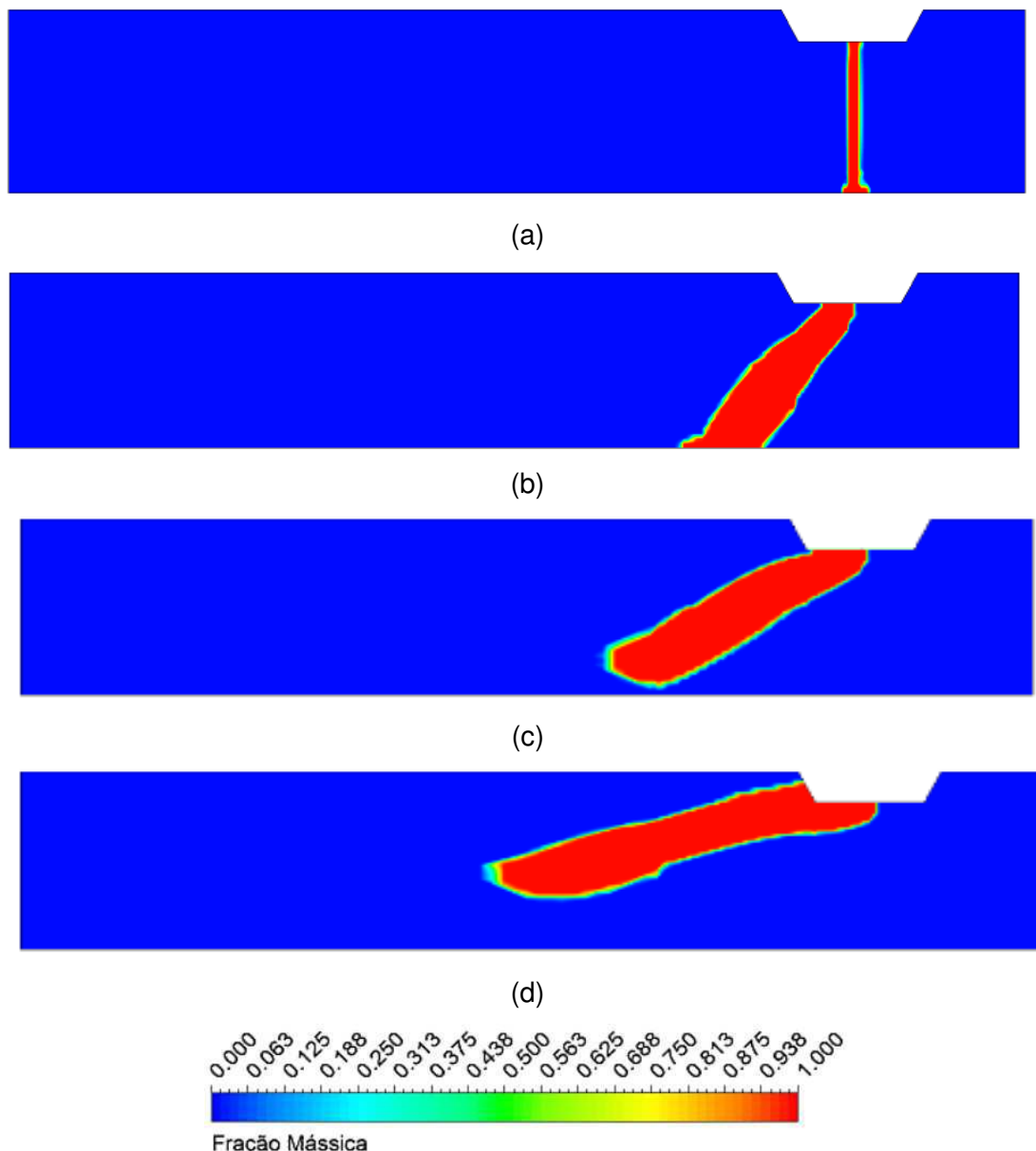


Figura 4 - Dispersão do contaminante cobre (Cu) em função do tempo. (a) Caso 4; (b) Caso 1; (c) Caso 5; (d) Caso 6. (5).

Observa-se que na Figura 4 (c), onde a velocidade de entrada de água é igual a 2 cm/s, que a pluma de contaminante evolui da direita para a esquerda, do domínio até se aproximar da base do solo. Verifica-se que ao contrário do que foi observado na velocidade da água nula e igual a 1 cm/s, a pluma não toca a rocha selante no tempo de 100 h.

Para o caso em que a velocidade de entrada é igual a 4 cm/s (Figura 4 (d)), observa-se que a pluma de contaminante é arrastada com mais intensidade, fazendo com que a pluma nas mesmas 100 h nem se aproxime da rocha selante (base do solo). Este fato é explicado pela força que o escoamento de água exerce sobre a pluma deslocando-a na direção horizontal (z).

4. CONCLUSÃO

Mediante os resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- A modelagem matemática foi capaz de prever numericamente o avanço da pluma de contaminante no meio poroso;
- O deslocamento da pluma de contaminante (Cobre) mostrou-se ser fortemente dependente da resistência oferecida do tipo de solo definido nas simulações, por meio da propriedade permeabilidade, do meio poroso;
- Os resultados das simulações indicam que para permeabilidades da ordem de 10^{-12} o transporte do contaminante é dominado pelo fenômeno de difusão. E para permeabilidades na ordem de 10^{-10} o fenômeno de dispersão por convecção mostrou-se ser dominante.

REFERÊNCIAS

1. Rebouças AC, Braga B, Tudinisi JG. Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. 2ª ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras; 2002.
2. Kulkamp MS, Corseuil HX, Amorim CJ. Influência do etanol na biodegradação de hidrocarbonetos de petróleo em um aquífero contaminado com uma mistura de diesel etanol. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2002. p. 1-11.
3. Haandel ACV, Marais G. O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operação. Campina Grande: Epgraf; 1999.

4. Santos JSS. Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Solos. Estudo de Caso: Lagoas de Estabilização. [Tese]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2015.
5. Os Editores
6. Baccan N, Andrade JC, Godinho OES, Barone JS. Química analítica quantitativa elementar. 3ª ed. São Paulo: Editora Edglard Blücher Ltda; 2003.