



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SIMULAÇÃO NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DO FLUXO DA FRANJA DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM LAGOAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Joaquim Mário Caleiro Acerbi; acerbi@ufu.br¹

¹Prof. Dr. da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Avenida João Naves D'Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Cep 38400-902, Uberlândia MG.

Resumo. *O fluxo de água contaminada decorrente da infiltração de esgotos urbanos, líquido contaminante, no solo de fundação, abaixo de lagoas de tratamento dos dejetos é simulado em diferenças finitas, através de modelo matemático que representa o fluxo transiente em solo não saturado, formando uma franja de contaminação simétrica em relação ao eixo central da bacia de decantação e tratamento de esgoto. Posteriormente, com dados de projeto e do local de implantação de uma estação de tratamento, e de ensaios de laboratório, um caso real é simulado. Foi usado o método das diferenças finitas com diferenças centrais por se tratar de um problema difusivo, com uma malha retangular e esquema explícito. Analisa-se a possibilidade de essa franja contaminante atingir o lençol freático, em uma análise bidimensional, fluxo transiente, em solo não saturado; e verifica-se, também, a possibilidade de um rio que passa próximo ao local das bacias de tratamento, ser atingido, através de análise bidimensional, fluxo permanente e em solo saturado, através da aplicação direta da equação da velocidade de percolação nos solos de Darcy. Constatou-se que em médio prazo o lençol freático é atingido. Em longo prazo o rio poderá também ser atingido, embora novos estudos e simulações sejam necessários para verificar a influência das reações químicas que podem ocorrer, que proporcionam a degradação do líquido percolante pelo efeito dos microorganismos presentes naturalmente nos solos. Pois estas reações provocam o retardamento do fluxo. Novos estudos estão sendo realizados para a determinação com mais precisão da concentração dos poluentes que atingirão o lençol freático e o rio.*

Palavras-chave: simulação, contaminação, solo, fluxo, transiente.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de lagoas de tratamento de esgoto e aterro sanitários é de grande interesse ambiental, principalmente nas análises de eventuais vazamentos e infiltrações nos solos de fundação, pois o fluxo de fluidos que eventualmente atingem os solos são muito impactantes em termos de contaminação, para a população, para fauna e flora circundantes. O controle e monitoramento são extremamente importantes, pois os custos de remediação são muito elevados, além de outros custos de eventuais ações judiciais de conseqüências imprevisíveis. Nas análises, a descrição de como a água se desloca é de fundamental importância para se saber se uma determinada frente de umidade, ou molhamento ou saturação, formando uma “Franja de Contaminação”, atingirá ou não o lençol freático, em quanto tempo e em que concentração. Interessa, assim, conhecer a extensão do dano, para a que se adotem as imediatas medidas de remediação ambiental. Na pesquisa do movimento da água no solo utilizaremos a equação de Richards, conforme apresentado por Reichardt, (1985). Esta equação deriva do princípio da conservação da massa e da equação de Darcy para relacionar as variações do teor de umidade com os potenciais gravitacional, matricial, osmótico, e de pressão para solos saturados e não saturados, conforme apresentado por Libardi (1995). Van Genuchten, (1980), propôs uma equação que relaciona o potencial matricial e o teor de umidade, conhecida como curva característica do solo. Neste trabalho, a equação de Richards será aplicada na sua forma de coordenadas cartesianas bidimensional, bem como a definição dos potenciais e a equação característica de um solo retirado de um local onde foi construída uma lagoa de tratamento de esgotos, obtida com um ajuste baseado em ensaios experimentais de laboratório, para a determinação do campo de distribuição de umidade que avança no solo de fundação, formando uma “franja de contaminação”. Ou seja, para determinação de uma frente lenta de contaminação / saturação proveniente do tratamento de esgotos domésticos. O problema é não linear devido a dependência que existe entre a condutividade hidráulica e o teor de umidade, não se tornando possível uma solução analítica. Assim, foi utilizado o método numérico das diferenças finitas para a solução do problema da determinação da frente de avanço da franja de contaminação com o tempo.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, DOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS, DOS EXPERIMENTOS E DO MODELO MATEMÁTICO

2.1. Descrição do Problema.

O problema proposto é a determinação da frente de saturação, “variação do teor umidade ao longo do tempo”, até chegar a 100%, ou seja, determinar a “franja de contaminação” criada que vai se propagando no solo de uma fundação de uma lagoa de tratamento de esgoto, depósito de esgoto “in natura”, para aeração forçada, para degradação biológica e eliminação de elementos patogênicos, para o posterior descarte no meio ambiente. Esta lagoa foi executada no município de Uberaba, MG, com uma geometria padrão de um tronco de pirâmide invertida, com 20 metros por 60 metros na sua parte do fundo, conforme croquis mostrado na figura 1, abaixo. A lâmina d’água durante a vida útil será de 5 metros de altura de esgoto doméstico. Os maciços de contenção formando aterros de até 6 metros de altura, executados em argila compactada, de baixa permeabilidade, e boa resistência ao cisalhamento, garantem a segurança contra rupturas. O fundo da lagoa foi constituído de 0,50 metros de argila compactada, apresentou-se, posteriormente, bastante degradada, pois ficou exposta alguns meses à condições climáticas de muito sol, e resfriamento à noite, apresentado sinais de fissuras provocadas pelo ressecamento do solo. Estas condições indicam que o solo de fundação original, ficará sujeito a uma provável contaminação, de maneira continuada. Segundo a NBR 9648, “Estudo da Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário”, de 1986, os esgotos domésticos são constituídos em sua maior parte de água contaminada por fungos e bactérias, coliformes fecais, matéria orgânica inerte e apenas uma pequena parte de material sólido. Como existe no fundo da lagoa de decantação um selo de 0,50 metros de espessura, de argila compactada, parcialmente ou totalmente fissurada, partimos da hipótese que somente a parte sólida será retida, e a água contaminada começara a fluir pelo solo de fundação da lagoa, formando uma “franja de contaminação”, pois o selo de argila tornou-se ineficiente. Conforme constatado pelas sondagens executadas no terreno, o solo de fundação é formado por um solo constituído de silte – areno - argiloso, de cor marrom, com de 22 metros de espessura, cujo lençol freático varia de uma profundidade de 1 a 8 metros de profundidade, dependendo da época do ano. No inverno, tempo mais seco, na posição mais profunda e época de chuva, no verão, na posição mais elevada. Este solo esta assente sobre uma formação de basalto, de alta resistência e impermeável. A trinta metros (30 m), lado esquerdo, numa cota de 1 metro abaixo da base de solo siltoso, está o nível de água do rio Uberabinha. Ensaios de laboratório e de campo mostraram que a permeabilidade deste solo siltoso, considerado como sendo isotrópico e homogêneo, é de $8,0 \times 10^{-6}$ m/s, constituindo um solo de permeabilidade baixa.

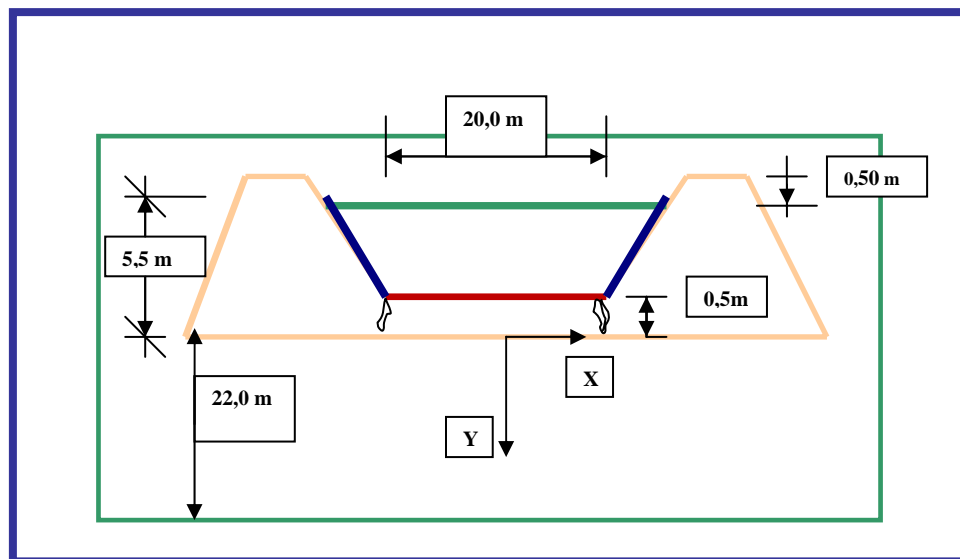


Figura 1 – “croqui” esquemático da lagoa de decantação para tratamento de esgoto

2.2 Caracterização dos Materiais e da Curva Experimental do Solo

Foram realizadas sondagens de campo e ensaios de laboratório para caracterização, classificação e determinação da permeabilidade (condutividade do solo na condição saturada) do solo de fundação da lagoa de tratamento de esgoto. O resumo das propriedades geotécnicas aparece na tabela 1, seguinte.

Tabela 1 - Caracterização do solo natural de fundação da lagoa de tratamento de esgoto
Densidade dos Grãos: 2,87
Condutividade Hidráulica – solo saturado $K_0 = K \text{ (m/s)} = 8,0 \times 10^{-6}$

| γ seco máximo g/cm ³ Lab. | γ seco máximo (g/cm ³) campo | Teor de umidade W (%) | Limite de liquidez LL (%) | Limite de plasticidade LP(%) | Coesão c(kPa) | Ângulo de atrito efetivo (Φ) em graus |
|---|---|-----------------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--|
| 1,635 | 1,55 | 12 | 42 | 35 | 5 | 30 |

Foram realizados dois experimentos de infiltração e de monitoramento do teor de umidade em blocos de solo. As amostras de solo forma coletadas com pequeno tubo fino metálico, e foi usado o método gravimétrico para medição do teor de umidade. No primeiro bloco foram feitas medidas somente na direção vertical e no segundo na direção vertical e horizontal. Para esse solo, através de medidas do potencial matricial em função da variação do teor de umidade em laboratório, foi determinada sua curva característica mostrada na figura 2, seguinte, cujo ajuste é executado com os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), eq.(1).

$$\Psi_m = \frac{1}{a} \left\{ \left[\frac{1}{\Theta} \right]^m - 1 \right\} \quad (1)$$

onde: Θ é o teor de umidade volumétrico do solo (adimensional);
 Ψ_m é o potencial total matricial (Pa);
 a, m e n são parâmetros de ajustes.

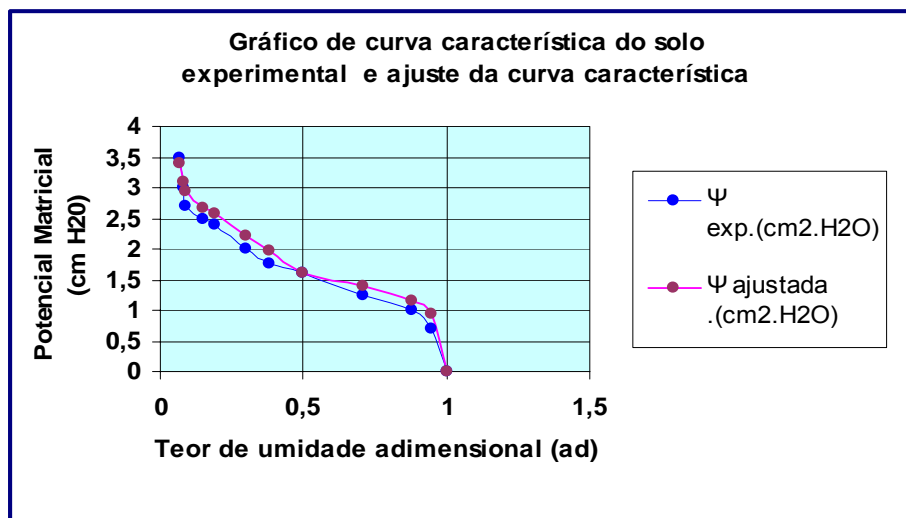


Figura 2 – Gráfico da curva característica do solo com os dados experimentais e ajuste da curva característica

Os parâmetros a , m e n são utilizados para se obter a condutividade hidráulica, que é função do teor de umidade do solo, e é expressa, também segundo Van Genuchten (1980) pela eq.(2), seguinte.

$$K(\Theta) = K_0 \Theta^L \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

Onde K_0 é condutividade hidráulica do solo saturado, m é parâmetro da curva característica. Segundo Mualem (1976), o parâmetro L pode ser considerado igual a 2. Assim, com estas colocações e com as análises pertinentes chegamos ao seguinte valores: $m = 0,768$; $n = 4,301$; $a = 0,674$ e $l = 2,0$.

2.3. Modelo Matemático e Solução Numérica

O movimento da água no solo ocorre devido à diferença de energia entre diferentes pontos no interior do maciço. Diferentes formas de energia ou potenciais podem ser caracterizados, e, assim, para que ocorra o fluxo é necessário a existência de gradientes de potencial total (Ψ). Segundo Reichardt (1985), este potencial, no caso de solos não saturado é a soma dos potenciais gravitacional (Ψ_g) e potencial matricial (Ψ_m), e no caso de solos saturados, gravitacional e de pressão (Ψ_p). Ainda segundo Reichardt (1985), o potencial osmótico que também pode ocorrer nos solos, pode ser desprezado na maioria dos casos, pois geralmente a concentração de íons na solução do solo não varia significativamente de posição para posição. Assim o efeito da variação da pressão osmótica não será considerada neste trabalho. O efeito de energia cinética também será desprezada pois as velocidades geralmente são muito baixas. As análises são para fluxos isotérmicos, assim o potencial térmico também não será considerado. Segundo Myazaki et al (1993), a equação de Richards relaciona as variações do teor de umidade com as variações do potencial total em um solo isotrópico homogêneo, com base na equação de Darcy e no princípio da conservação da massa. Em coordenadas cartesianas bidimensional esta equação assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \quad (3)$$

onde: Θ é o teor de umidade volumétrico do solo (adimensional); $\Theta =$ Densidade do solo \times
 Ψ é o potencial total (m), por unidade de peso de fluido;
 x e y são variáveis espaciais (coordenadas cartesianas);
 $K(\Theta)$ em (m/s) é a condutividade hidráulica, considerada a mesma nas direções x e y (isotropia).

$$\Theta = \frac{\rho_{solo_{seco}}}{\rho_{\acute{a}gua}} [w], \text{ onde } w \text{ é o teor de umidade mássica do solo, } w = \frac{\text{massa}_{\acute{a}gua}}{\text{massa}_{solo_{seco}}};$$

$\rho_{\acute{a}gua}$ é a massa específica da água;

$\rho_{solo_{seco}}$ é a massa específica do solo seco. Assim a equação (3) pode também ser reescrita:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{solo_{seco}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K(w) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(w) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right\} \quad (4)$$

A condutividade hidráulica continua função do teor de umidade em massa do solo, não em volume. A dependência entre condutividade hidráulica e o teor de umidade do solo torna a equação de Richards (3) não linear, portanto, tornando a solução analítica inviável. Implementou-se solução numérica do problema bidimensional, utilizando a eq. (3) com as condições de contorno ou fronteiras (5) abaixo especificadas.

Utilizou-se o Método das Diferenças Finitas com diferenças centrais, por ser um problema difusivo, devido à reduzida velocidade com que a água percola no solo.

Domínio de análise: $0 < y < H$, e $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$ onde B é largura da lagoa ou do bloco de solo no laboratório e H é altura do bloco ou espessura ou profundidade do solo de fundação da lagoa. .

Condições de contorno:

$\Theta(x,0,t) = \Theta_{máximo} = 0,46 = 46\% = n$, para qualquer $t > 0$, $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$, e onde n é a porosidade e esta situação só ocorre para saturação igual a 100%.

$\Theta(x,y,0) = \Theta_0 = 0,34 = 34\%$, para $0 < y < H$, $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$ e $t = 0$, condição inicial do solo em análise nos blocos ou no fundo da lagoa.

$\frac{\partial \Theta}{\partial y}(x,H,t) = 0$ para $t > 0$, fronteira impermeável no fundo do bloco e no solo de fundação da lagoa.

$\frac{\partial \Theta}{\partial y}(x,0,t) = \phi_t$, para $t > 0$ e $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$, onde ϕ_t é o fluxo de água no topo;

$\frac{\partial \Theta}{\partial x}(-\frac{B}{2},y,t) = \frac{\partial \Theta}{\partial x}(\frac{B}{2},y,t) = 0$ para $0 < y < H$, $-\frac{B}{2} \leq x \leq \frac{B}{2}$ e $t > 0$, fronteiras impermeáveis também nas laterais.

Foi utilizada malha de 41 pontos na direção x e 21 pontos na direção y, e intervalos de tempo de 0,1 hora para os experimentos de laboratório e de 0,5 horas e 1 hora para as simulações da franja de contaminação na lagoa, obtendo-se pequenas variação de valores para malhas mais refinadas.

2.4 Experimentos para Validação do Modelo Numérico

Durante o processo de pesquisa foram retirados doze blocos indeformados, cubos de 0,40 m de lado, devidamente acondicionados. Dois foram usados na obtenção da equação característica, e dez blocos foram usados na validação do método numérico. Assim, foram realizados experimentos de infiltração e de monitoramento do teor de umidade em blocos de solo para validação do modelo matemático. Nos blocos de solo foram realizadas coletadas no topo e na base, nas bordas, em tempos diferentes, pequenas amostras de solo, que foram utilizadas para determinar os teores de umidade, na posição central e nas bordas, durante ensaios de infiltração para uma carga constante de 0,10 m, para os tempos, em horas, de 0,1; 0,5; 1; 2; 4 e 8 horas para teor de umidade no topo da amostra. E 0,1; 0,5; 1; 2; 4; 8; 12; 24; 48 horas para o teor de umidade para base da amostra na posição central. E 0,1; 0,5; 1; 2; 4; 8; 12; 24; 48 e 72 horas para base da amostra nas bordas, conforme fig.(3), abaixo.

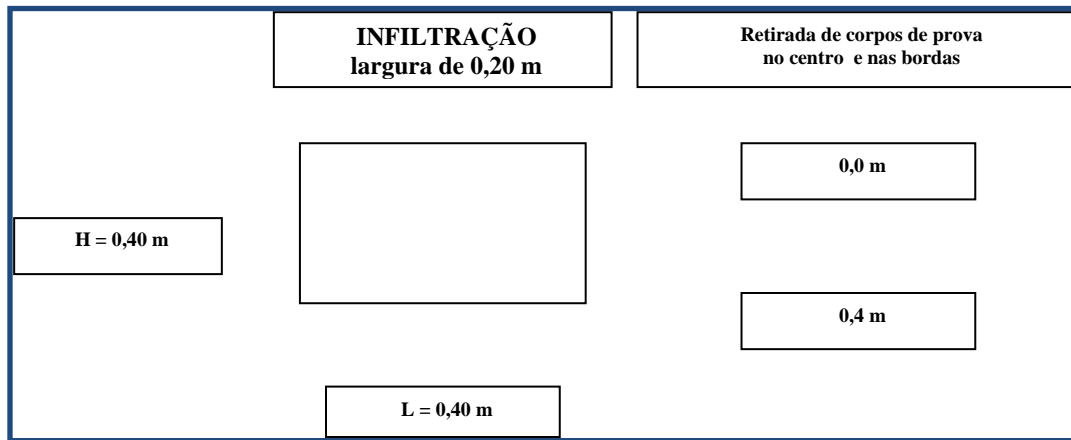


Figura 3 – Pontos de coleta de corpos de prova de solo, à profundidade de 0,0m e 0,40 m, no centro e nas bordas, para determinação do teor de umidade – experimento para validação do modelo matemático

Os valores de propagação das umidades gerados com o modelo matemático foram comparados com os valores dos teores de umidade medidos nas amostras de solo. O erro médio na previsão da variação do teor de umidade com o tempo, em relação ao medido no laboratório para aquela posição, e para aquele tempo, foi de aproximadamente -5%. Sendo que o erro mínimo calculado foi de -2%, para o tempo de 8 horas, e o erro máximo de -8% para o tempo de 72 horas. Os resultados gerados pelo modelo matemático e os determinados em laboratório foram expressos através de gráficos, sendo 3 deles apresentados nas figuras 4 e 5 a seguir.

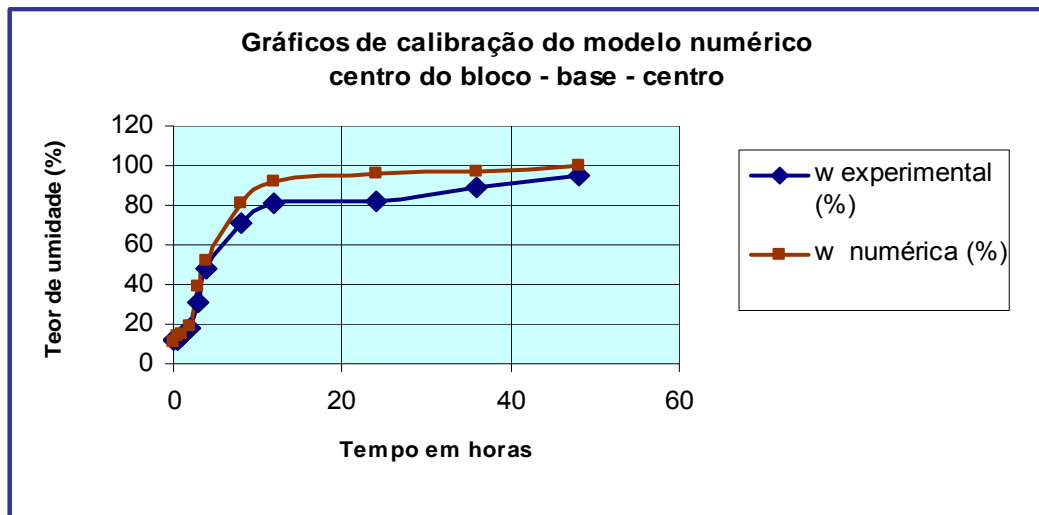


Figura 4 – Comparação entre os valores gerados pelo modelo matemático e os medidos em laboratório no centro do bloco - topo.

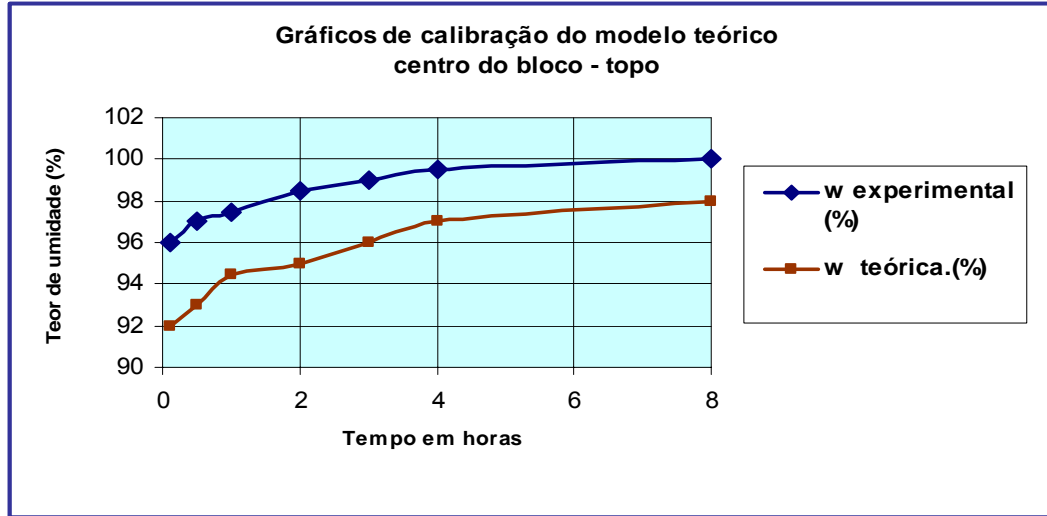


Figura 5 – Comparação entre os valores gerados pelo modelo matemático e os medidos em laboratório, no centro do bloco – topo.

3. Análises dos Resultados

As figuras 7 e 8 seguintes apresentam os resultados das simulações da frente de umedecimento ou franja de contaminação em função do tempo para diversas profundidades tomadas na vertical do centro e borda do fundo da lagoa de tratamento de esgoto.

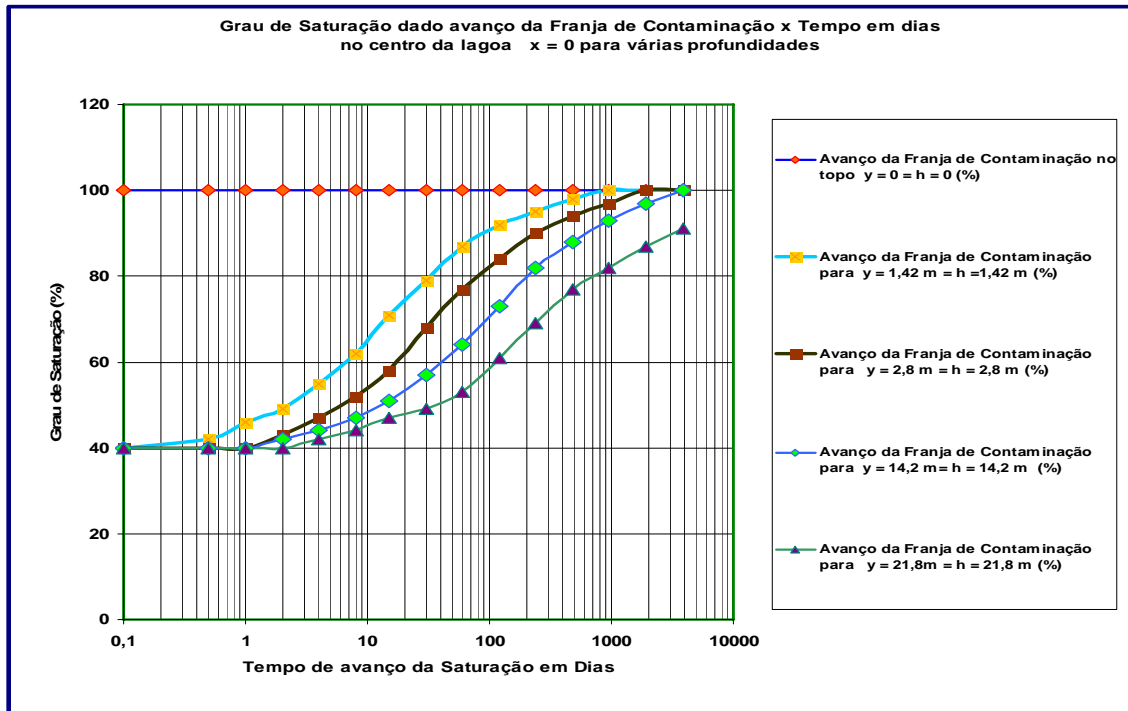


Figura 7 – Simulação da Frente de Saturação – Franja de Contaminação do solo na vertical do ponto central no fundo da lagoa para diversas profundidades.

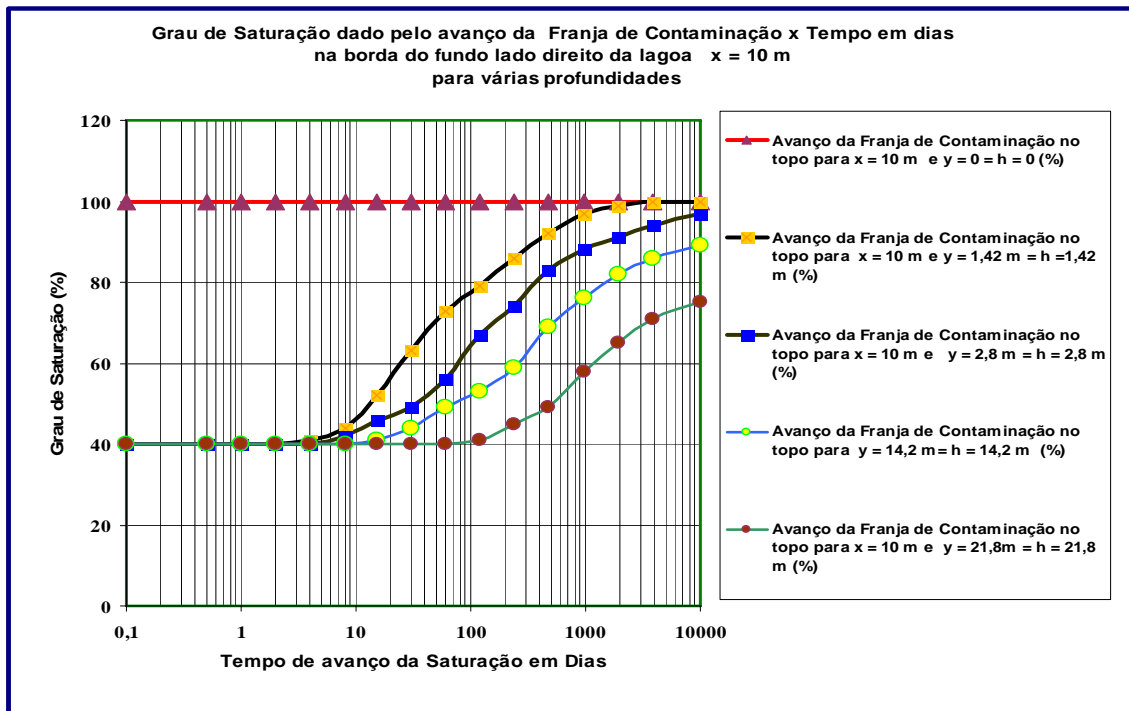


Figura 8 – Simulação da Frente de Saturação – Franja de Contaminação do solo na vertical do ponto na borda no fundo da lagoa para diversas profundidades.

Os resultados do programa revelaram que:

- A tendência observada no comportamento das curvas calculadas é semelhante a tendência observada na seqüência dos dados experimentais;
- O procedimento matemático adotado modela com bastante precisão o movimento de água no solo usando a equação de Richards, dando uma boa informação da frente de umedecimento, franja de contaminação no solo;
- A maior diferença nos experimentos foi alcançada para 72 horas e com erro de -8%;
- Mesmo com esta diferença pode-se considerar que há boa concordância entre os dados experimentais e os dados calculados;
- Considerando-se o nível do lençol freático na sua posição mais elevada a frente de contaminação com 80 % de saturação atingirá o lençol em cerca de 30 dias;
- Considerando-se o nível do lençol freático na sua posição média, ao longo do ano, no ponto mais elevado, a frente de contaminação com 80 % de saturação atingirá o lençol em cerca de 200 dias;
- Em longo prazo toda a carga de contaminação (100% de saturação), atingirá o lençol freático contaminando a água que abastece os rios e córregos locais;

- O rio, teoricamente, receberia 80% da frente de saturação depois de cerca de 7 meses, embora seja necessário verificar o retardamento da frente de contaminação por outros efeitos, como por exemplo, a ação de microorganismos presentes naturalmente no solo que podem interferir no processo.

4. Conclusões

Foi desenvolvido um modelo matemático para determinar a frente de umedecimento – saturação decorrente da infiltração de esgoto nos solos de fundações de lagoas de tratamento de esgoto. Foram realizados experimentos para medição de teor de umidade para diferentes pontos, num plano x, y, para a validação inicial deste modelo, que embora existam incertezas na coleta de dados experimentais, permitiu validar o procedimento matemático para análise de um problema real. O modelo descreve bem a distribuição da frente de umidade, saturando e contaminando o solo. O modelo desenvolvido ainda é limitado pois indica que há contaminação do solo e em que tempo esta franja contaminante vai começar a se formar após iniciar o processo de poluição, e o seu alcance com o tempo, mas não indica a concentração de poluentes. Serão necessários outros e novos estudos para acoplar a equação de Fick, da difusão de contaminantes e outros fenômenos, como reações químicas, para que o processo de contaminação seja modelado de maneira mais completa e eficiente. Mas mesmo assim, pode-se considerar que houve boa concordância entre os resultados experimentais e os calculados, e que possivelmente, as simulações das frentes de umedecimentos representem bem as franjas reais de contaminação na sua geometria e tempos de percolação. Os resultados comprovam ainda que as simulações realizadas mostram o deslocamento da frente de umidade para diferentes instantes de tempo e evidenciam o acerto do uso da equação de Richards para estudar o comportamento da frente contaminante no solo, considerando as influências das condições de fronteira.

4. Referências Bibliográficas

- Libardi, P.L., 1995, “Dinâmica da Água no Solo”, Piracicaba, 497p.
- Myazaki, T., Hasegawa, S., and Kasubuchi, T., 1993, “Water Flow in Soils”, New York, Marcel Dekker, Inc.
- Mualen, Y., “1976, “A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media”, Water Resour. Res.; Washington. V.12, p513-522.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986, “Estudo da Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário”, 5p. Rio de Janeiro.
- Reichardt, K., 1985, “Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera”, 4.ed. Fundação Cargill, 445p, Campinas.

5. DIREITOS AUTORAIS

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho

BIDIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF FRINGE CONTAMINATION FLUX IN SOIL FROM TREATMENT LAGOONS OF SEWAGE

Joaquim Mário Caleiro Acerbi; acerbi@ufu.br¹

¹Prof. Dr. da Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Avenida João Naves D'Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Cep 38400-902, Uberlândia MG.

Abstract. The flow of contaminated water due to infiltration of urban sewage, liquid contaminant in the soil foundation, beneath treatment lagoons of sewage is simulated in finite differences, using a mathematical model representing the transient flow in unsaturated soil, forming a fringe contamination symmetrical about the central axis of the tailing pond and sewage treatment. Later, with project data and location of implantation of a treatment plant, and laboratory tests, a real case is simulated. It was used the finite difference method with central differences because it is a diffusion problem, with a mesh rectangular and the explicit scheme. Analyze the possibility of this fringe contaminant reaches the water table in a bidimensional analysis, transient flow in unsaturated soil, and there is also the possibility of a river that passes near the site of the basins of treatment, be reached through analysis of unidimensional, steady flow and saturated soil, through the direct application of the equation of the of percolation in the soil of Darcy. It was found that in the medium time the water table is reached. In the long time the river could also be reached too, although further studies and simulations are necessary to ascertain the influence of chemical reactions that can occur, providing the degradation of the liquid percolating through the effect of microorganisms naturally present in soils. For these reactions slowing the flow. Further studies are being conducted to determine more accurately the concentration of pollutants that reach the water table and river.

Keywords: simulation, contamination, soil, stream, transient.

The author is solely responsible for the content of the printed material included in your work