

# **Colmatação dos solos na lagoa anaeróbica da Estação de Tratamento de Esgoto de Passo Fundo**

## **Soils colmatation in the anaerobic lagoon from Passo Fundo Sewer Treatment Station**

**Eduardo Pavan Korf, Antonio Thomé, Anderson Fonini, Pedro D. M. Prietto**

*Universidade de Passo Fundo - UPF, Passo Fundo, RS.*

*e-mail: [eduardokorf@gmail.com](mailto:eduardokorf@gmail.com), [thome@upf.br](mailto:thome@upf.br), [anderson.fonini@gmail.com](mailto:anderson.fonini@gmail.com); [pdmp@upf.br](mailto:pdmp@upf.br)*

**RESUMO:** O esgoto doméstico constitui um dos maiores problemas a serem geridos. O tratamento pode ser realizado em lagoas, que são impermeabilizadas para evitar contaminação subterrânea. A estação de tratamento araucárias em sua construção não previu impermeabilização de fundo. O trabalho avaliou a colmatação dos solos de fundo da ETE Araucária pelos finos do esgoto com o passar do tempo. Um equipamento simulou a percolação de água e esgoto nos dois tipos de solos e avaliou a variação permeabilidade ao longo do tempo. Constatou-se, que quando foi utilizado esgoto como líquido percolante, ocorreu a redução de 46 vezes na permeabilidade para o solo de corte e 10 vezes para o solo de aterro após 6 meses de percolação. Com a água como líquido percolante, constatou-se redução de cerca de 6 vezes na permeabilidade para o solo de corte e aterro. A redução na permeabilidade não assegura a contenção das contaminações, pois, outros fenômenos de transporte como os difusivos, ainda persistem.

**ABSTRACT:** The domestic sewer constitutes one of the biggest problems to be managed. The treatment can be carried out through stabilization lagoons, which must be impermeabilized to prevent groundwater contamination. This study evaluated the bottom soil colmatation by the sludge from sewer over the time. Equipment was built what simulated water and sewer percolations in two types of soils (cut soil and fill soil). It was evaluated the permeability variation throughout the time. The results shown that has occurred the reduction of 46 times in the permeability coefficient value when the liquid percolating was sewer for cut soil and 10 times reduction for the fill soil, after 6 months of percolation. With water as percolation liquid it was observed the reduction in permeability coefficient was 6 times for both soils. However, the reduction in permeability coefficient does not guarantee that will not occurred the groundwater contamination, because there are other transport phenomenons such as diffusion transport that still persist in the place.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os efluentes produzidos nas cidades que, em sua maioria, são lançados de forma direta em corpos da água, necessitam de tratamento adequado, pois podem causar alterações no ambiente aquático, poluição das águas e danos à saúde humana. O tratamento de esgoto doméstico é, muitas vezes, realizado em lagoas de tratamento, as quais devem, de acordo com a legislação atual, obedecer a critérios de impermeabilização com o fim de impedir a contaminação de lençóis freáticos. Porém, em alguns locais, estas estações

são construídas sem a devida impermeabilização de fundo.

Em relação aos critérios proteção da contaminação de corpos hídricos, o art. 132 do código estadual do meio ambiente determina que “é proibida a disposição direta de poluentes e resíduos de qualquer natureza em condições de contato direto com corpos d’água naturais superficiais e subterrâneas, em regiões de nascentes ou em poços ou perfurações ativas ou abandonadas, mesmo secas” [17].

Em Passo Fundo, a ETE araucárias entrou em funcionamento no ano de 2006 e realiza o

tratamento biológico do esgoto doméstico em lagoas de estabilização. As lagoas de estabilização não apresentam nenhum sistema de impermeabilização e estão localizadas em uma região de banhados e nascentes que, segundo o art 51. do código estadual do meio ambiente, capítulo VII, são considerados objetos especiais de proteção [17]. Sem barreiras de impermeabilização, o esgoto, que contém diversas substâncias nocivas, pode percolar através do solo.

Nesses casos, estudos têm demonstrado que ao longo do tempo os vazios do solo seriam preenchidos pelas partículas sólidas existentes no efluente, causando a impermeabilização ou colmatação natural do solo [6, 13]. De acordo com Dacach [10], a permeabilidade de fundo de lagoas de estabilização diminui com o decorrer do tempo, devido a colmatação do solo de fundo. Segundo Von Sperling [21], em condições favoráveis as perdas por infiltração são da ordem de menos de 10 % da vazão da lagoa e consideradas com frequência inferiores a 1 %. Mara [15] propõe as seguintes interpretações para o coeficiente de permeabilidade:  $k > 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ , solo permeável e o fundo deve ser protegido;  $k > 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ , alguma filtração irá ocorrer;  $k < 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ , o fundo se impermeabilizará naturalmente;  $k < 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , não há risco de contaminação.

De forma análoga ao afirmado por Provenzi [16] no que diz respeito à sistemas filtrantes de efluentes por membranas, a colmatação em meios porosos compreende a adsorção de moléculas de soluto na superfície das partículas, obstrução de poros por partículas em suspensão e depósito de material em suspensão sobre a superfície do meio.

O processo de degradação da microbiota também pode favorecer a colmatação, pois segundo Haandel e Cavalcanti [14], quando a bactéria usa o material orgânico como substrato, este é transformado em massa celular ou em produtos da degradação. Isso favorece a redução do tamanho dos poros em consequência a permeabilidade do meio.

Com a colmatação em solos ocorre a redução do fluxo e em consequência do processo advectivo de transporte de poluentes. O processo advectivo, segundo Delgado [11], ocorre devido à condição de fluxo e é decorrente dos gradientes de pressão que estão atuando. Segundo Demuelenaere [12], no transporte de contaminantes através da advecção, a pluma de contaminação move-se na

mesma velocidade linear média do fluido percolante, geralmente a água, não havendo alteração no pico de concentração, sendo a condutividade hidráulica o principal parâmetro relacionado ao transporte de contaminante.

Não obstante, ainda persistem os processos dispersivos de transporte, em que se destaca a difusão molecular. O estudo da difusão de contaminantes em solos se dá quando há a predominância deste processo sobre os fenômenos dependentes do fluxo hidráulico, ou seja, quando a velocidade é muito baixa. A baixa velocidade de fluxo pode ocorrer quando a permeabilidade e/ou o gradiente hidráulico são baixos. No caso do transporte por dispersão hidrodinâmica, a parcela da dispersão mecânica torna-se insignificante e o parâmetro de dispersão hidrodinâmica passa a ser governado de forma exclusiva pela parcela da difusão molecular [9]. No caso da colmatação de uma camada de solo, isso também pode ocorrer.

O processo de transporte por difusão molecular independe do fluxo e é explicado pelo transporte mássico, devido a gradientes de concentração. Segundo Shackelford [18], os constituintes deslocam-se sob influência de sua energia cinética na diferença dos gradientes de concentração, independentemente de um gradiente hidráulico ou velocidade fluxo. O transporte difusivo é regido pela primeira lei de Fick, considerando o transporte unidimensional.

O estudo em questão busca verificar, para os solos de fundo da lagoa anaeróbia da ETE Araucária de Passo Fundo, a ocorrência de colmatação e inferir a possibilidade de contaminação subterrânea, visto da inexistência de impermeabilização de fundo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Lagoa anaeróbia

A ETE Araucárias, situada na BR-285 no município de Passo Fundo (RS), foi construída parte sob solo natural, denominada área corte e parte sob solo aterrado. Esta área encontra-se em uma região de banhados e nascentes. No projeto de construção da ETE não foi prevista impermeabilização de fundo. A figura 1 apresenta a área de estudo.



Figura 1 -Lagoa anaeróbia, ETE Araucária, Passo Fundo, RS

## 2.2 Solo

Foram utilizados os solos de corte e da área de fundo à lagoa anaeróbia (figura 1).

A caracterização geotécnica foi realizada no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo. Foram realizados ensaios de limite de liquidez e plasticidade, análise granulométrica e peso específico real dos grãos. As normas utilizadas para os ensaios foram: NBR 6457 [1]; NBR 6459 [2]; NBR 6508 [3]; NBR 7180 [4]; NBR 7181 [5].

A caracterização química foi efetuada nos laboratórios de análise de solo e química do solo da Universidade de Passo Fundo. Foi realizada análise completa, de acordo com Tedesco [20], abordando: pH em H<sub>2</sub>O; Índice SMP; Argila (%); Concentração de Matéria-Orgânica; Macronutrientes (P, K, S, Ca, Mg); Cátions básicos trocáveis (Ca, Mg) e Cátions ácidos trocáveis (S, H+Al); CTC (total de cátions trocáveis); Micronutrientes (Mn, Zn, Cu, B); Saturação por bases, saturação por Alumínio, saturação por Potássio e condutividade elétrica.

As caracterizações dos solos estão apresentadas nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Características geotécnicas dos solos

Parâmetros	Corte	Aterro
Densidade Real dos Grãos (kN/m <sup>3</sup> )	2,6	2,6
Argila (%)	26,6	40,8
Silte (%)	7,6	7,3
Areia Fina (%)	64,8	51,2
Areia Média (%)	1,0	0,7
Limite de Liquidez (LL)	27,6	35,7
Limite de Plasticidade (LP)	21,2	28,5
Índice de Plasticidade (IP)	6,4	7,2

Tabela 2 - Análise química dos solos

Parâmetros	Corte	Aterro
pH em H <sub>2</sub> O	4,9	4,7
Índice SMP	5,25	4,8
Argila (%)	31	43
MO (%)	-	<0,8
P (mg.dm <sup>-3</sup> )	10,5	2
K (mg.dm <sup>-3</sup> )	18,5	18,5
S (mg.dm <sup>-3</sup> )	16,5	26,5
Ca (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	0,4	0,4
Mg (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	0,2	0,3
Al (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	3,35	5,8
H+Al (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11,15	23,15
CTC (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11,75	8,5
Manganês (mg.dm <sup>-3</sup> )	5,5	9,5
Zinco (mg.dm <sup>-3</sup> )	1	0,85
Cobre (mg.dm <sup>-3</sup> )	1,9	0,9
Boro (mg.dm <sup>-3</sup> )	<0,1	<0,1
Saturação – Bases (%)	0,6	0,55
Saturação – Al (%)	84,5	86
Saturação – K (%)	0,45	0,3
Condutividade elétrica (mS.cm <sup>-1</sup> )	0,011	0,033

A classificação geotécnica do solo local seguiu o sistema Unificado – SUCS de acordo com ASTM D 2487 [8]. A classificação pedológica do solo foi realizada de acordo com Streck *et al.* [19].

Para o solo da área de corte, a classificação geotécnica, segundo o método unificado [8], apresenta uma argila siltosa/argilosa e silte de baixa compressibilidade. Segundo Streck *et al.* [19], a pedologia do solo é de um Gleissolo Melânico que apresenta característica de má drenagem e predominância de Ferro no estado reduzido. Para o solo da área de aterro a classificação geotécnica, segundo o método unificado [8], como silte de baixa compressibilidade. Segundo Streck *et al.* [19], a pedologia do solo é de um Latossolo Vermelho distrófico, o qual apresenta característica de estágio avançado de intemperização, capacidade de troca catiônica baixa, boa drenagem e elevados teores de ferro na predominância oxidada.

## 2.3 Esgoto

O esgoto foi coletado na estação de bombeamento de recalque para a ETE, garantindo que se obtenha a característica final do esgoto, após a rede coletora municipal. O esgoto foi armazenado em recipientes de vidro âmbar com capacidade de 1 L e encaminhado ao Laboratório

de Análise de Controle de Efluentes (LACE), da UPF, para realização de análises físico-químicas. As análises efetuadas foram: DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspensos, pH e os metais ferro, zinco, manganês, cobre, cromo, chumbo e cádmio. Elas seguiram descrição de *American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, [7]). A tabela 3 apresenta a caracterização do esgoto.

Tabela 3 - Caracterização físico-química do esgoto

Parâmetros	Valor
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	410
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	128
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,47
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,02
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	0,03
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	0,02
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.D.*
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.D.*
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.D.*
Sólidos Suspensos (mg.L <sup>-1</sup> )	172
pH	7,84

\*N.D. – Não detectável pelo método

## 2.4 Experimento

No laboratório de geotecnia da Universidade de Passo Fundo, desenvolveu-se um permeâmetro, que consistiu em simular as condições de campo, utilizando corpos de prova moldados com os solos extraídos do fundo da lagoa. Estes solos foram submetidos, de forma separada e em duplicata, à percolação de água e esgoto, sendo mantida carga constante de 2,5 m, equivalente a campo. A figura 2 apresenta o equipamento desenvolvido. As letras “A” e “C” significam o solo da área de aterro e corte, respectivamente.



Figura 2 - Permeâmetro para estudo da colmatção

No fundo de cada coluna (fig. 2) foi montado um filtro composto por areia, brita e tecido filtrante. Lama bentonítica com traço 1:9 foi adicionada no espaço existente entre a parede do tubo e a amostra de solo, com o fim de evitar o fluxo preferencial pelas laterais do corpo de prova. Os corpos de prova de ensaio foram de 10 cm de diâmetro por 25 cm de altura. O esgoto e a água foram inseridos nos tubos da parte superior do equipamento, assumindo um fluxo descendente para os corpos de prova. A figura 3 apresenta um corpo de prova utilizado no ensaio e as figuras 4, 5 e 6 a montagem de cada coluna.



Figura 3 - Corpo de prova utilizado no ensaio



Figura 4 - Montagem das colunas



Figura 5 - Vista superior das colunas



Figura 6 - Montagem do equipamento

O equipamento, para percolação de esgoto, sofreu algumas modificações, após a montagem inicial. O modelo do equipamento não favorecia o contato direto dos sólidos presentes no esgoto com o solo, pois os mesmos sofriam decantação no recipiente de depósito. A modificação realizada consistiu em inserir, nas quatro colunas de esgoto, tubos de 200 mm de diâmetro permitindo que o efluente fosse inserido no interior dos tubos mantendo a mesma carga constante de 2,5 m e proporcionando melhor representatividade da situação real de campo.

Para execução do ensaio, foi determinada a condutividade hidráulica ao longo do tempo. O ensaio iniciou com a percolação de água em março de 2006 e a percolação com esgoto iniciou em julho de 2006, em decorrência das modificações realizadas. Ambos os ensaios foram realizados até dezembro de 2006.

A figura 7 apresenta o modelo final do equipamento.

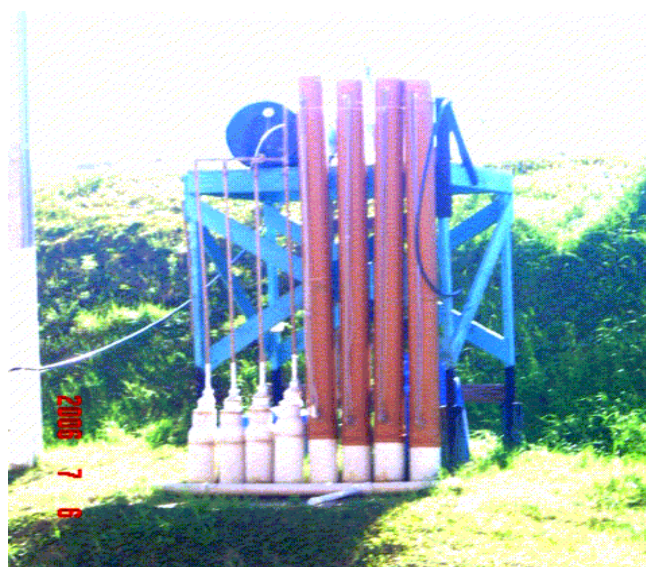


Figura 7 - Modelo Final do equipamento

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, o comportamento médio mensal da permeabilidade dos solos submetidos à percolação de esgoto e água durante o período estudado.

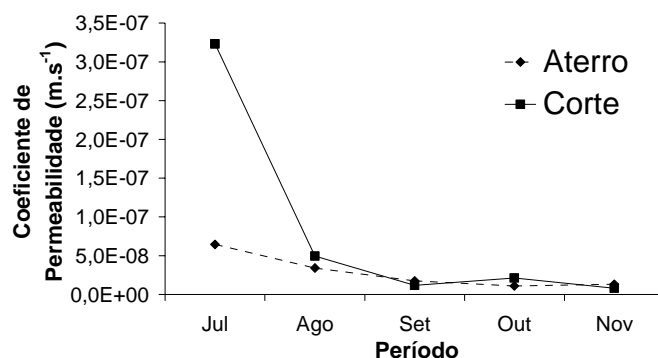


Figura 8 - Comportamento da permeabilidade com a presença de esgoto

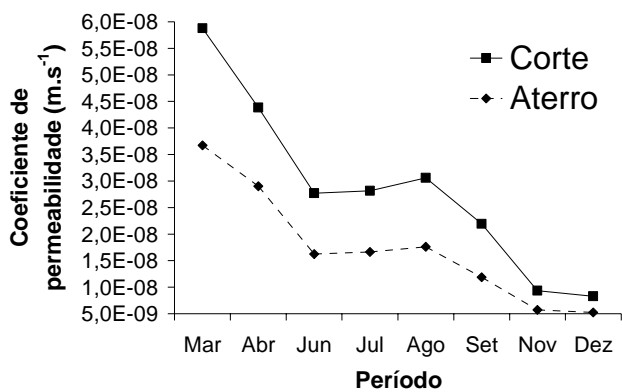


Figura 9 - Comportamento da permeabilidade com a presença de água

A figura 8 apresenta a queda de permeabilidade do solo em contato com o esgoto, considerando o período de julho até dezembro de 2006, ou seja, 6 meses. Para o solo da área de aterro o coeficiente de permeabilidade inicial foi cerca de  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$  e o final foi de  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , o que representou uma redução de cerca de 10 vezes. Para o solo da área de corte o coeficiente de permeabilidade inicial foi cerca de  $3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$  e o final foi de  $8,2 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , o que representou uma queda de cerca de 46 vezes da permeabilidade do solo.

A figura 9 apresenta a queda de permeabilidade do solo em contato com a água, considerando o período de março a dezembro de 2006, 9 meses. Para a água, em comparação com o efluente, a permeabilidade do solo apresentou uma redução inferior. O período de 9 meses registrou-se uma redução da permeabilidade de cerca de 6 vezes para ambos os solos. O coeficiente de permeabilidade final para o solo de corte foi cerca de  $3 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  e para o solo da área de aterro foi cerca de  $5 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ .

O estudo ratifica a hipótese de Dacach [10], de que a permeabilidade de fundo de lagoas de estabilização diminui com o tempo e de Mara [15] que com permeabilidades abaixo de  $10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ , o solo de fundo se impermeabilizará naturalmente. Isso realmente foi o que aconteceu, pois os coeficientes de permeabilidades sofreram reduções significativas até na ordem de  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ , atingindo, segundo Mara [15], uma faixa em que não há mais risco de contaminação.

As reduções das permeabilidades no esgoto podem estar associadas à adsorção de moléculas e por depósito de material em suspensão nos poros do solo, conforme afirmado por Provenzi [16]. As reduções da permeabilidade observadas também

podem ser explicadas pelo processo de degradação realizado pelos microorganismos que geram massa celular, segundo Haandel e Cavalcanti [14], a qual também pode promover a obstrução dos poros. Essa hipótese pode auxiliar no entendimento da redução da permeabilidade observada do solo em contato com a água.

A redução da permeabilidade maior para o solo da área de corte é explicada pela ocorrência de um Gleissolo melânico, o qual apresenta maior CTC. A maior CTC implica em maior adsorção de partículas na superfície dos colóides do solo. Além disso, segundo Streck *et al.* [19], este solo apresenta característica de má drenagem natural, o que em si é um fator redutor da permeabilidade pela estagnação dos líquidos.

Com a redução das permeabilidades e em consequência do fluxo os solos de fundo da lagoa funcionam como uma barreira argilosa de baixa permeabilidade. Com isso, ocorre redução do transporte advectivo do contaminante. No caso dos transportes dispersivos, a parcela de dispersão hidrodinâmica, passa a ser governada de forma essencial pela difusão molecular, em virtude de que a dispersão mecânica torna-se desprezível, pois depende da velocidade de fluxo [9].

No que diz respeito à legislação vigente e as faixas propostas por Mara [15], após a ocorrência da colmatação, a lagoa de estabilização está de acordo com os critérios propostos. Porém ressalta-se que o fenômeno de transporte por difusão molecular, que ocorre devido a gradientes de concentração continua ocorrendo, podendo ser o causador de contaminações subterrâneas.

#### 4. CONCLUSÕES

A colmatação dos solos pelo efluente foi constatada para ambos os solos estudados. No que diz respeito à contaminação subterrânea o estudo não comprova que essa impermeabilização, resultante do processo de colmatação, é responsável por impedir o deslocamento de plumas de contaminações. O que ocorreu foi a redução do processo advectivo de transporte de contaminantes. O processo de difusão molecular, que faz parte da dispersão hidrodinâmica, ainda persiste sem o fluxo e pode em si ser o causador de poluições subterrâneas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio fornecido pelo CNPq pelo financiamento de bolsa de pesquisa ao primeiro (processo 7303011/2008-4), e segundo autor (processo 800896) e a CAPES pelo apoio financeiro concedido.

## REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: Amostras de solo - Preparação de ensaios de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro, 1986.
2. \_\_\_\_\_. *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.
3. \_\_\_\_\_. *NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira 4.8mm - determinação de massa específica*. Rio de Janeiro, 1984.
4. \_\_\_\_\_. *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.
5. \_\_\_\_\_. *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.
6. ALVES, Gislaíne P. M. *Capacidade de atenuação de solos de fundo da lagoa anaeróbia da ETE araucárias*. 2005. 89p. Dissertação (Mestrado em infra-estrutura e meio-ambiente) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.
7. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. ed. Washington: APHA, 2000.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: D2487*. Philadelphia. 1993. 11.p
9. BARONE, F.S. et. al. *Effect of multiple contaminant migration on diffusion and adsorption of some domestic waste contaminants in a natural clayey soil*. Canadian Geotechnical Journal, Canadá, v. 26, p. 189-198, 1989
10. DACACH, N. G. *Saneamento Básico*. 3ª ed. Rio de Janeiro: EDC - Editora Didática e Científica, 1990.
11. DELGADO, C. W. C. *Mecanismos de Transporte de Metais Pesados*. Salvador. Disponível em: <<http://www.geoamb.eng.ufba.br>>. Acesso em 10 dez. 2002.
12. DEMUELENAERE, R. G. A. *Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais o Rio de Janeiro*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica – Rio, Rio de Janeiro. 2004.
13. FONINI, A.; ROJAS, J. W. J; THOMÉ, A. *Análise da probabilidade de colmatção dos solos de fundo da ETE Araucárias*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 8. 2006, Curitiba. Anais... Curitiba: UNICEMP, 2006.
14. HAANDEL, A. V.; CAVALCANTI, P. F. F. *Geração e composição de lodo em sistemas de tratamento de esgotos sanitários*. In: ANDREOLI, C. V. *Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001.
15. MARA, D. D. *Design manual for waste stabilization Curitiba, ponds in Índia Lagoon technology international (1997)*. Disponível em: <<http://www.leeds.ac.uk/civil/cei/water/tphe/publicat/pdm/india/india.htm>> . Acesso em: 11. jun. 2004.
16. PROVENZI, G. *Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: Estudos hidrodinâmicos e Físico-químicos no controle da colmatção*. 2005. Tese (Doutorado) – Programa de pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
17. RIO GRANDE DO SUL. Lei 11520, de 3 de agosto de 2000. *Institui o Código estadual do meio ambiente do estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências*. Porto Alegre – RS, 2000.
18. SHACKELFORD, C. D. *Contaminant transport*. In: DANIEL, D. E. *Geotechnical practice for waste disposal*. London: Chapman & Hall, 1993. p. 33-65.
19. STRECK, E. V., et al. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER, 2002. 107 p.
20. TEDESCO, M. J. et al. *Análise de solo, planta e outros materiais: Boletim técnico nº 5*. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995.

21. VON SPERLING, M. *Lagoas de Estabilização*.  
2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de  
Engenharia Sanitária e Ambiental;  
Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.