



## **II-383 - ENSAIO HIDRODINÂMICO EM SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS UTILIZADOS NO PÓS TRATAMENTO DE DECANTO DIGESTOR INSTALADO NO SEMI-ÁRIDO NORDESTIDO**

**Aníbal da Fonseca Santiago<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

**Maria Lúcia Calijuri**

Doutora em Engenharia Civil. Professora Titular da Universidade Federal de Viçosa (UFV/MG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas Avenida P. H. Rolfs, s/n 36570-000 – Viçosa (MG), Brasil Tel.: (31) 3899-3093 Fax: (31) 3899-3098 E-mail: anibalsantiago@gmail.com

### **RESUMO**

O comportamento hidrodinâmico de unidades utilizadas para tratamento de esgoto doméstico é determinante no que tange seu desempenho. No caso dos alagados construídos, em especial, deve-se levar em conta poucas informações na literatura nacional a respeito do comportamento hidrodinâmico dos mesmos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi a realização de ensaio hidrodinâmico em sistema de tratamento de esgotos (decanto-digestor seguido de alagados construídos) através do uso de traçador. A areia utilizada, de granulometria muito fina, afetou sobremaneira a hidrodinâmica dos alagados construídos, fazendo com que houvesse uma lâmina sobre o material suporte. Isso diminuiu o tempo de detenção hidráulica dos alagados e pode ter ocasionado menor eficiência do sistema. Areia com granulometria muito fina deve ser evitada para esse tipo e sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alagados Construídos, Decanto-digestor, Ensaio hidrodinâmico

### **INTRODUÇÃO**

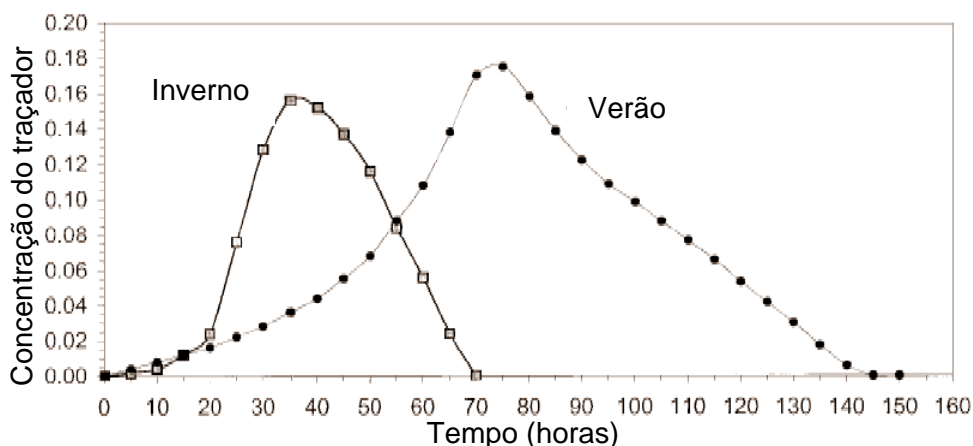
De acordo com Lima et al. (2003), nos processos biológicos de tratamento de esgotos as reações bioquímicas que ocorrem no processo e o transporte hidráulico são dois fatores principais e devem ser considerados a fim de otimizar o processo. Ainda segundo esses pesquisadores, diversas são as causas que podem influenciar no transporte hidráulico dos constituintes presentes em um reator, dificilmente, o fluxo hidráulico se comporta como o considerado previamente no projeto.

Nos alagados construídos o transporte hidráulico ainda influenciado por diversos fatores não controláveis, como chuvas, ventos, insolação e temperatura, interferem no processo de depuração dos mesmos. Dessa forma, o conhecimento das características do escoamento dos alagados construídos podem indicar futuras modificações desejáveis no sistema para obtenção de uma melhor eficiência no tratamento de esgoto doméstico.

MERLIN et al. (2002) mostraram como a hidrodinâmica foi determinante no desempenho dos alagados construídos estudados. O tempo de detenção hidráulica que era de 4 a 5 dias passou a ser de 6 dias no período de verão, o que ocasionou maior tempo de contato do efluente com o biofilme e raízes das macrófitas, resultando numa maior eficiência de remoção de poluentes. Na Figura 1 apresentam-se os resultados dos ensaios de MERLIN et al. (2002) para determinação do tempo de residência hidráulica real, no período de inverno (março) e verão (julho).

Para Dantas et al. (2000) é importante o conhecimento do comportamento hidrodinâmico de um reator, afim de estabelecer-se os regimes de fluxo (fluxo pistão, fluxo mistura completa ou ambos) e detectar-se a presença de anomalias do fluxo no aparato do processo (detecção de zonas mortas, canais preferenciais, curtos-circuitos, etc, que reduzem a eficiência do reator).

**Figura 1: Distribuição do tempo de residência do traçador num alagado construído com evapotranspiração máxima (verão) e evapotranspiração mínima (inverno). Fonte: MERLIN et al., 2002.**



Para o caso dos alagados construídos, em especial, deve-se levar em conta poucas informações na literatura nacional a respeito do comportamento hidrodinâmico dos mesmos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi a realização de ensaio hidrodinâmico em sistema de tratamento de esgotos (decanto-digestor seguido de alagados construídos) através do uso de traçador.

## MATERIAL E MÉTODOS

Esse experimento foi desenvolvido no município de Nova Redenção, situado no estado da Bahia, na Zona Fisiográfica da Chapada Diamantina, semi-árido nordestino, domínio da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu. Tal município localiza-se entre as coordenadas, de latitude S 12°46'00" e de longitude W 41°22'00". É caracterizado por clima transicional entre o tropical-úmido e o semi-árido, com insuficiência de precipitação, baixa umidade do ar e considerável evaporação. A precipitação pluviométrica oscila em torno de 500 mm anuais, podendo ocorrer períodos de seca prolongados, provocando sérios prejuízos à economia da região. (FILHO et al, 2001). A temperatura anual média é de 23,6 °C (SILVA E AZEVEDO, 2000). Esses últimos autores obtiveram o índice hídrico do município ( $I_h = -10,9$ , para capacidade de água disponível de 125 mm) e observaram que o mesmo indica que essa localidade está inserida em áreas onde há longo período de estiagem.

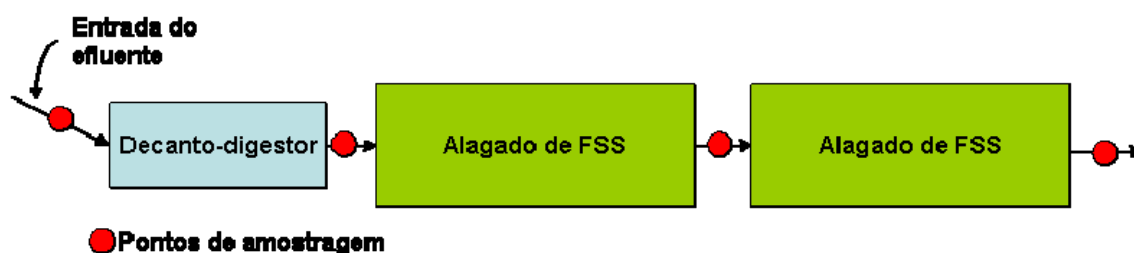
## DESCRIÇÃO GERAL DAS UNIDADES ESTUDADAS

O sistema piloto de tratamento de esgoto doméstico foi constituído por decanto-digestor com filtro acoplado (DD), executado em alvenaria com revestimento interno impermeabilizado. Após o decanto-digestor instalou-se duas unidades de alagados construídos de fluxo sub-superficial em série (Alagado 1 e 2). Os tanques para instalação dos alagados construídos foram escavados e revestidos com geomembrana em PVC com espessura nominal de 1,00 mm e gramatura de 1.300 g m<sup>-2</sup>.

A macrófita utilizada foi o capim-tifton 85 (*Cynodon spp.*). A densidade de plantio foi de aproximadamente quinze propágulos por metro quadrado. Optou-se pela utilização de areia lavada, único material possível financeiramente e disponível no local. As unidades de tratamento construídas em escala piloto foram instaladas como indicado na Figura 1. A alimentação do sistema é realizada por meio de canalizações em PVC (100 mm), a partir da rede de coleta.



Figura 1: Diagrama esquemático da unidade piloto estudada.



A taxa de aplicação hidráulica média em cada alagado foi de  $117 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (cada alagado com área superficial de  $70 \text{ m}^2$ ). A altura do preenchimento do material suporte adotada foi de  $0,6 \text{ m}$ . Na Tabela 1 apresenta-se as dimensões do tanque considerando a inclinação dos taludes.

Tabela 1: Dimensões do alagado construído.

Comprimento a meia profundidade	20,0 m
Largura a meia profundidade	3,5 m
Profundidade	0,6 m
Borda livre	0,2 m
Inclinação do talude	$45^\circ$
Comprimento do fundo	19,4 m
Comprimento no nível do material suporte	20,6 m
Comprimento da crista do talude	21,0 m
Largura do fundo	2,9 m
Largura no nível do material suporte	4,1 m
Largura da crista do talude	4,5 m

Adotou-se declividade longitudinal de  $1 \%$  e a relação comprimento/altura foi igual a 5. O volume útil de cada alagado é de  $38,1 \text{ m}^3$ . Para cálculo desse volume útil considerou-se a altura da lâmina d'água de  $0,55 \text{ m}$ ,  $5 \text{ cm}$  menor que a altura preenchida pelo material suporte. Assim, o comprimento no nível da água é de  $20,55 \text{ m}$  e a largura de  $4,05 \text{ m}$ .

O TDH foi calculado pela razão entre o volume útil e a vazão. Como a água que percorre o material suporte utiliza apenas os espaços vazios, há que se considerar o índice de vazios do material suporte. Neste caso, a areia utilizada tem porosidade de  $51\%$ . Na Tabela 2 apresenta-se as principais características da areia utilizada como meio suporte.

$$\text{TDH} = (38,1 \text{ m}^3 \times 0,51) / 16,46 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} = 1,18 \text{ dias}$$

VALENTIM (2003) estudou alagados com esse tempo de detenção hidráulica e obteve resultados satisfatórios. No caso deste trabalho como o sistema foi composto por dois alagados em série, obteve-se um tempo total de detenção hidráulica (teórico) nos dois alagados de  $2,36 \text{ dias}$ .

Tabela 2: Principais características da areia utilizada como material suporte nos alagados construídos.

Granulometria	0,074 a $2,000 \text{ mm}$
Diâmetro específico ( $D_{10}$ )	$0,150 \text{ mm}$
Coefficiente de uniformidade ( $D_{60}/D_{10}$ )	2,66
Porosidade	$51\%$

## ENSAIO HIDRODINÂMICO

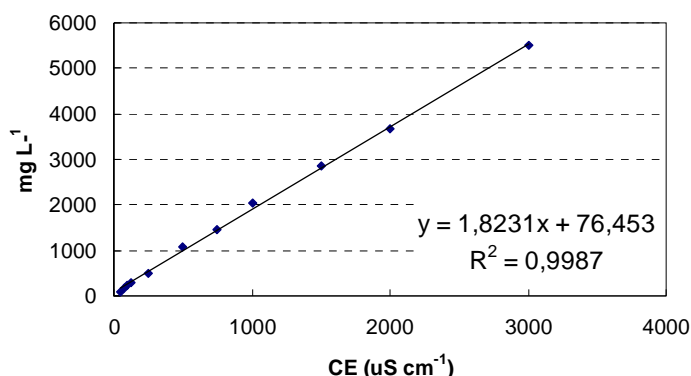
Em princípio, seriam realizados dois ensaios hidrodinâmicos do sistema. Um no período chuvoso e outro no período de seca. Porém, somente foi possível a realização de um ensaio, que apesar de ter sido realizado no período de seca, durante sua realização ocorreu precipitação.

O estudo hidrodinâmico foi realizado com a utilização de cloreto de sódio comercial (NaCl) como traçador em ensaio do tipo pulso. O NaCl foi escolhido, principalmente pela facilidade de sua obtenção no município. O traçador foi preparado dissolvendo-se 12kg de NaCl em 24 litros de água. Foi lançado em um único pulso no afluente do sistema.

A diluição do traçador não pôde ser completa, o produto não era de boa qualidade e continha cristais grandes de NaCl que não puderam se diluir. O material não diluído foi recolhido e seu peso seco (2,102 kg) descontado da diluição prevista inicialmente. Assim, a diluição final da solução de traçador foi de 412 g L<sup>-1</sup>. DANTAS et al. (2000) utilizaram uma solução traçadora com concentração de 320 g L<sup>-1</sup> para um filtro anaeróbio com volume de 3,36 m<sup>3</sup>. O volume aproximado do decanto-digestor aqui estudado é de 36,0 m<sup>3</sup>.

Posteriormente à injeção da solução de traçador, amostras dos efluentes de cada unidade foram coletadas periodicamente em intervalos de uma hora, durante três vezes o tempo teórico de detenção hidráulica, aproximadamente seis dias. Nas amostras realizaram-se leituras de condutividade elétrica em condutivímetro modelo MACA150P da MARCONI, com o objetivo de construir uma curva de distribuição do tempo de detenção hidráulica. A concentração de NaCl foi obtida através da equação gerada a partir da curva de calibração do condutivímetro utilizado. A calibração correlacionou a concentração desse sal com a condutividade elétrica (Figura 2).

**Figura 2: Curva de calibração do condutivímetro usado no ensaio hidrodinâmico.**



A partir da curva de concentração do NaCl, calculou-se o número de dispersão axial, o tempo médio de detenção hidráulica e a variância.

Para cálculo do tempo de detenção médio, utilizou-se a equação 1 e calculou-se a variância pela equação 2, equações retiradas da obra de LEVENSPIEL (1974).

$$TDH = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i(t)}{\sum_{i=1}^n C_i(t)} \quad \text{.....Equação 1}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot C_i(t)}{\sum_{i=1}^n C_i(t)} - TDH^2 \quad \text{.....Equação 2}$$



Para o cálculo do coeficiente longitudinal de dispersão axial utilizou-se a equação 3 (LEVENSPIEL, 1974), visto que a curva não apresentou cauda alongada e não indicou grande dispersão.

$$\left(\frac{D}{uL}\right) = \frac{\sigma^2}{2TDH^2} \dots\dots\dots \text{Equação 3}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ENSAIO HIDRODINÂMICO NO DECANTO DIGESTOR

A Tabela 2 mostra os parâmetros hidrodinâmicos calculados para o decanto-digestor.

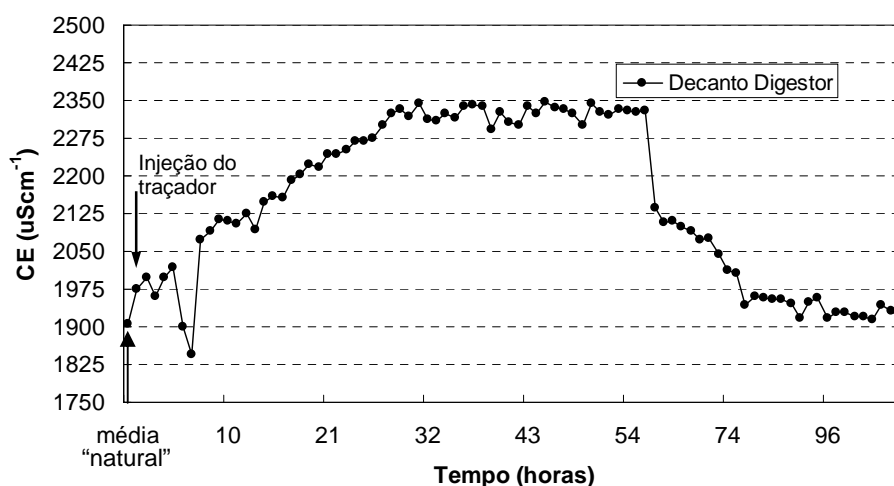
**Tabela 2: Parâmetros hidrodinâmicos calculados.**

TDH	Variância	Dispersão axial
45,8 horas	920,8	0,22

Os resultados obtidos mostraram que essa unidade aproxima-se do modelo de fluxo em pistão, indicado pelos baixos valores de dispersão axial. Nas curvas de CE dos ensaios hidrodinâmicos não há formação de cauda nas curvas, o que é indicação de tendência de fluxo em pistão.

O TDH médio real está acima do previsto, que foi de 12h. Isso aconteceu em função da baixa vazão de entrada no DD. A vazão média de entrada é 7,0 m³ d-1 é inferior a vazão mínima prevista no projeto (8,2 m³ d-1). Além disso, durante a noite a vazão afluente ao sistema chega a zero. Do ensaio hidrodinâmico realizado no DD gerou-se a curva de condutividade apresentada na Figura 2. O tempo de monitoramento durou 112 h até que a condutividade relativa à concentração inicial fosse alcançada novamente. Como concentração inicial utilizou-se o valor médio de CE encontrada no efluente do DD ao longo de quatro semanas. O valor médio anterior de CE no efluente do DD está indicado na Figura 2.

**Figura 2: Curva de condutividade gerada a partir do ensaio hidrodinâmico no decanto-digestor.**



### ENSAIO HIDRODINÂMICO NOS ALAGADOS

O TDH real calculado para os alagados foi de 2,4 dias e 2,5 dias, para o alagado 1 e 2, respectivamente. Esse tempo foi maior que o estimado no projeto (1,2 dias para cada alagado).

Deve ser considerado que a condutividade dos efluentes dos alagados não voltou a patamares do início do ensaio hidrodinâmico, mesmo depois de 150 horas de monitoramento. Chegou apenas a patamares mais baixos e

estáveis, como visto nas Figura 3 e 4. O tempo real de permanência do traçador nos alagados foi maior que o tempo monitorado, assim os tempos de detenção hidráulica calculados (2,4 e 2,5 dias) ainda são menores que o real.

Os altos valores de variância calculados (1687,7 e 1682,2, para alagados 1 e 2, respectivamente) estatisticamente, representam a alta dispersão da distribuição dos valores de concentração da curva. Isso demonstra a dispersão provocada pela tendência de aumento da concentração durante o dia e decaimento da mesma durante a noite. Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se as curvas de condutividade do ensaio hidrodinâmico realizado nos alagados.

Observa-se o aumento e o declínio da condutividade no período do dia e da noite, respectivamente. Essas figuras mostram, também, que no terceiro dia de monitoramento, por volta de 53 horas, ocorreu uma chuva, que causou uma súbita diluição do efluente dos dois alagados. Passada a chuva, os valores de condutividade voltaram a subir durante o dia, e no período noturno subsequente passou por mais um decaimento.

As áreas sombreadas do gráfico demarcam os períodos noturnos. As duas primeiras áreas são mais largas, pois referem-se aos períodos de monitoramento da CE com intervalos de medição de uma hora. Depois de 56 horas de monitoramento, passou-se a um intervalo de medição de 2 horas, daí as menores larguras das faixas seguintes.

**Figura 3: Curva de condutividade gerada a partir do ensaio hidrodinâmico no Alagado 1.**

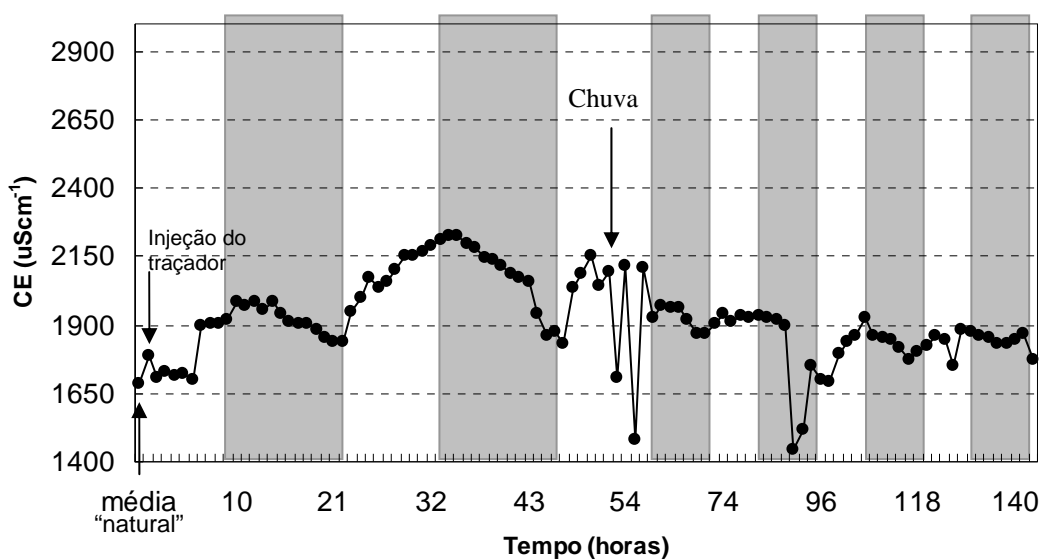
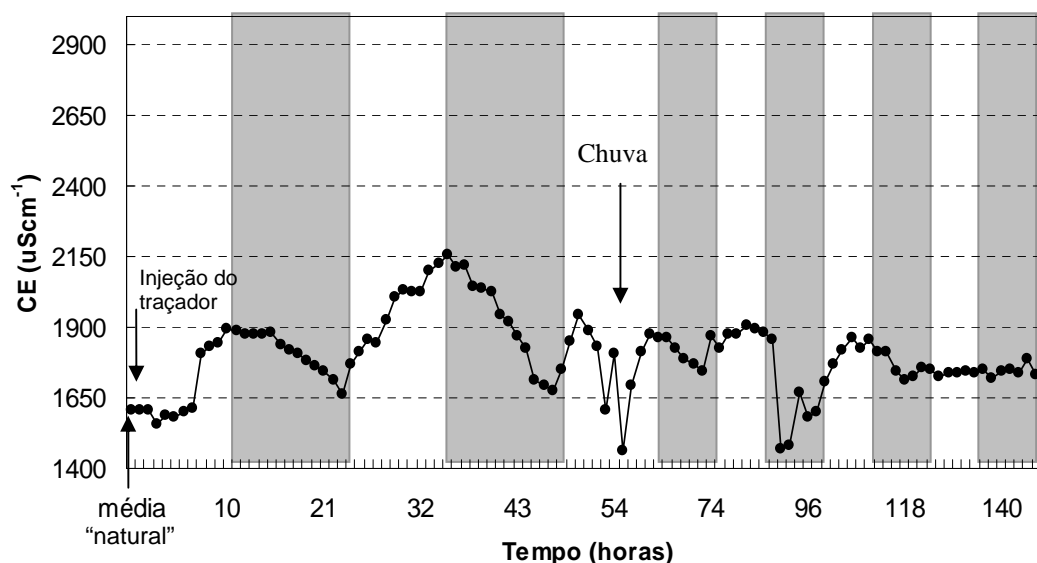




Figura 4: Curva de condutividade gerada a partir do ensaio hidrodinâmico no Alagado 2.



Uma lâmina de esgoto de aproximadamente 2 cm de altura flui sobre o material suporte dos dois alagados. Essa lâmina tem origem em dois aspectos: o material suporte utilizado é areia com índices de vazios baixo e alto coeficiente de uniformidade; e a camada de cascalho que deveria ser colocada para melhor distribuir os afluentes aos alagados, na realidade, foi colocada apenas ao redor dos tubos, tanto de distribuição quanto de recolhimento do efluente. Isso não possibilita a correta distribuição do fluxo, além de criar caminhos preferenciais. SHUTES (2001) afirmou que em sistemas desse tipo a sobrecarga causa um fluxo superficial sobre o material suporte, o que pode diminuir a eficiência do sistema.

A tendência é da lâmina d'água aumentar ao longo do tempo, à medida que o material suporte for colmatando-se. Isto deve-se à granulometria da areia utilizada.

Os alagados têm funcionado durante o dia como escoamento superficial nos solos. Durante a noite a vazão afluente aos alagados diminui substancialmente, e os mesmos passam a descarregar a vazão do volume "guardado" durante o dia nos vazios de seu material suporte. Por isso, nos períodos noturnos a condutividade sofreu decaimentos.

Esse ensaio apenas verificou o que está já era percebido nos alagados. A partir dos dados obtidos do ensaio, não foi possível calcular a variância e a dispersão axial, isso em função das peculiaridades desses alagados. O diâmetro muito pequeno da areia utilizada provocou a ocorrência dessa lâmina d'água acima do material suporte, durante as maiores vazões afluente. Considera-se também a ocorrência de precipitação durante o ensaio hidrodinâmico, o que inviabilizou o cálculo daqueles parâmetros.

### LIMITAÇÃO DA CARGA HIDRÁULICA PARA AREIA FINA

Como exercício para verificação da limitação do uso de areia com granulometria muito fina poder-se-ia calcular a carga hidráulica segura, que evitaria a sobrecarga hidráulica, como ocorrido no sistema estudado.

A vazão considerada seria aquela ocorrida no período noturno, momento que não havia lâmina d'água sobre o material suporte, período de 20 h às 8 h do dia seguinte. Foi realizada a medição do perfil de vazão nesse período e obteve-se um valor aproximado de  $1,7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ . Se existissem mais dados de vazão noturna a carga poderia ser calculada de acordo com a equação 4.

$$TAS = \frac{VAZÃO}{ÁREA} \dots\dots\dots (Equação 4)$$





$$TAS = \frac{1,7 m^3 dia^{-1}}{70 m^2} = 0,024 \times 1000 = 24 mm dia^{-1}$$

Assim, a carga hidráulica de 24 mm dia<sup>-1</sup> seria a máxima carga hidráulica que não provocaria lâmina sobre o material suporte. É um valor de carga que está abaixo da maioria dos estudos já realizados com esses sistemas e aumentaria acentuadamente a necessidade de área para os alagados. Outro problema é que como a granulometria da areia é muito fina, mesmo com baixa carga o material suporte têm grande possibilidade de colmatar.

## CONCLUSÕES

A areia utilizada, de granulometria muito fina, afetou sobremaneira a hidrodinâmica dos alagados construídos, fazendo com que houvesse uma lâmina sobre o material suporte. Isso diminuiu o tempo de detenção hidráulica dos alagados e pode ter ocasionado menor eficiência do sistema. Areia com granulometria muito fina deve ser evitada para esse tipo de sistema. Neste trabalho essa areia foi utilizada por ser o único material disponível e financeiramente viável, na época da pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Proc. 500075/2006-9) e à FAPEMIG pelo financiamento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DANTAS, M. A. R., MELO, H. N. S., ANDRADE NETO, C. O. (2000) Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Porto Alegre, RS Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-043.pdf>
2. FILHO, O M., LEAL, R. A. MORAES, L. C. (2001) Chumbo de Nova Redenção Estado da Bahia. Informe técnico – CPRM Salvador, BA.
3. LEVENSPIEL, O, (1974) Engenharia das Reações Químicas, v2, Edgar Blucher.
4. LIMA, E. P. C.; SOUSA, J. T. VAN HAANDEL A. (2003) Comportamento hidrodinâmico do sistema wetland no póstratamento de esgoto doméstico. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Joinville, Santa Catarina
5. MERLIN G., Pajean, J. e Lissolo, T. (2002) Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area. Hydrobiologia 469: 87–98.
6. SHUTES, R.B.E. (2001) Artificial wetlands and water quality improvement. Environment International. 26: 441-447.
7. SILVA, B. G. e AZEVEDO, P. V. (2000) Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina” no Estado da Bahia para o cultivo de Cítrus. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 8 (1): 133-139.
8. VALENTIM, M.A.A. (2003) Desempenho de leitos cultivados (“constructed wetland”) para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação. Tese de Doutorado - FEAGRI-Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP - Campinas, SP.