

## ARTIGO TÉCNICO

# ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR ANÁLISE DE IMAGEM: VALIDAÇÕES E ESTUDO DE CASO

## STUDY ON THE PERFORMANCE OF WASTEWATER TREATMENT PLANT BY IMAGE ANALYSIS: VALIDATION AND CASE STUDY

**MAURÍCIO DA MOTTA**

Doutor em Eng. de Processos pelo Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL-França), Professor do Depto. de Eng. Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ/UFPE)

**MARIE-NOËLLE PONS**

Doutora de Estado em Eng. de Processos pelo INPL (França), Dir. de Pesquisa CNRS no Laboratoire des Sciences du Genie Chimique (LSGC/INPL)

**NICOLAS ROCHE**

Doutor em Eng. de Processos pelo Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL-França), Professor do IUT da Universidade de Marseille (França)

**HERVÉ VIVIER**

Doutor em Química Estrutural pela Université de Franche Comté (França), Professor da Universidade de Saint Etienne (França)

**ANTÔNIO LUIS AMARAL**

Mestre em Eng. Biológica pelo Depto. de Eng. Biológica da Univ. do Minho (Portugal), Doutorando do Depto. de Eng. Biológica da Universidade do Minho (Portugal)

**EUGÊNIO CAMPOS FERREIRA**

Doutor em Eng. Química pela Universidade do Porto (FEUP - Portugal), Professor do Depto. de Eng. Biológica da Univ. do Minho (Portugal)

**MANUEL MOTA**

Doutor em Eng. Bioquímica pelo INSA (Toulouse – França), Professor Catedrático do Depto. de Eng. Biológica da Univ. do Minho (Portugal)

Recebido: 07/06/02 Aceito: 08/11/02

**RESUMO**

Um método baseado na análise de imagens foi desenvolvido para caracterizar os flocos de lodo ativado em termos do seu tamanho e forma (dimensão fractal) e da abundância de bactérias filamentosas. Após ter sido testado em experimentos em escala piloto, o método foi validado para estações de tratamento reais. Foram analisadas doze estações de tratamento de esgotos situadas na França e em Portugal, de tamanhos e processos diferentes. Em seguida realizou-se um acompanhamento sobre a estação de Braga (Portugal) que estava com problemas de intumescimento do lodos (“bulking” filamentosos).

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo ativado, flocos, morfologia, bactérias filamentosas, análise de imagem

**ABSTRACT**

*Automated methods based on image analysis have been developed to characterise activated sludge in terms of size and shape (fractal dimension) of flocs and abundance of filamentous bacteria. After tests on pilot-scale reactors, the method has been validated on samples from twelve different full-scale wastewater treatment plants of different sizes and processes in France and Portugal. Finally sludge morphology changes have been monitored during a bulking event on a full-scale plant in Portugal.*

**KEYWORDS:** Activated sludge, flocs, morphology, filamentous bacteria, image analysis.

## INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos pode ser realizado por via físico-química ou biológica. A escolha entre o processo leva em conta o tipo de efluente a tratar, sua biodegradabilidade, e presença de toxinas, a produção de lodos, etc. Devido ao seu menor custo de funcionamento e sua simplicidade operacional, o processo biológico é em geral escolhido para o tratamento de efluentes urbanos e certos tipos de efluentes industriais. Dentre os processos biológicos, um dos mais amplamente utilizados é o tratamento por lodos ativados, que consiste em colocar o esgoto a ser tratado em contato com uma elevada concentração de microorganismos que vão digerir a matéria orgânica com auxílio do oxigênio fornecido no tanque de aeração. Em seguida, a biomassa microbiana é separada da água tratada por decantação no clarificador. Uma parte desta biomassa retorna ao tanque de aeração e uma outra é retirada, a fim de manter a concentração de microorganismos constante.

Nos processos de crescimento disperso, como é o caso dos lodos ativados, as bactérias se aglomeram sob a forma de floco bacteriano. Estes flocos são formados segundo a teoria do esqueleto filamentososo (Jenkins et al., 1993) por bactérias filamentosas, que irão dar a estrutura ao floco e por bactérias zoogleais, produtoras de exo-polímeros que servirão para unir estas bactérias formando o floco bacteriano. Um bom equilíbrio entre estas espécies de bactérias produz flocos com boas características de decantação e adensamento. Os principais fenômenos que ocorrem oriundos do desequilíbrio são:

- Lodo pulverizado ou “pin-point flocc” - que é formado por uma diminuição na concentração de bactérias filamentosas, causando uma ruptura dos flocos e assim a formação de pequenos agregados que podem não decantar. Desta forma, estes pequenos flocos irão sair com o efluente final, aumentando o teor de matéria orgânica e a sua turbidez.

- Intumescimento do lodo ou “bulking filamentososo” - este fenômeno é caracterizado por uma forte redução da velocidade de decantação, causado por um desenvolvimento excessivo de bactérias filamentosas, que está geralmente ligado a uma carência de substrato. Estas bactérias ultrapassam largamente os limites dos flocos, aumentando a resistência à decantação e ligando uns flocos aos ou-

tros (Figura 1). Este fenômeno é o mais comum, sendo responsável por mais de 60% dos problemas em estações de tratamento por lodos ativados.

- formação de espuma ou “foaming” - como o próprio nome diz, é caracterizado pela formação de uma camada de espuma na superfície do tanque de aeração. Esta espuma é formada devido ao excesso de bactérias filamentosas, que ao contrário do caso do bulking, possuem um caráter hidrofóbico. Se não for combatida, a espuma transborda causando perda de biomassa microbiana. Richard (1989) considera que certas espécies, como a *Nocardia sp.*, são responsáveis apenas pelo “foaming”. Contudo Da Motta (2001) verificou também a ocorrência do fenômeno de bulking filamentososo quando da infestação de uma estação pela *Nocardia sp.* Duchêne e Cotteux (1998) explicam a origem do “foaming” e a passagem do caráter hidrofóbico para hidrofílico de certas bactérias como a *Microthrix parvicella*.

Existem várias espécies de bactérias filamentosas que se desenvolvem por razões específicas, tais como: falta de um nutriente específico como o fósforo, ou de oxigênio; a presença de toxinas; tipo de carga; etc. Para combater o desenvolvimento excessivo destas bactérias, geralmente utilizam-se compostos clorados, peróxido de oxigênio ou produtos específicos (Jenkins et al., 1993). A dosagem destes produtos deve ser realizada com bastante cautela para não provocar a morte de toda a microfauna.

Vários estudos em estações de tratamento de efluentes foram realizados a fim de observar qual espécie de microorganismo filamentososo predominava em cada país. Segundo Rossetti et al. (1994); Madoni et al. (2000); Westlund et al. (1996); Pujol et al. (1994) e Wanner et al. (1998) a *Microthrix parvicella* predomina na Europa. Já nos Estados Unidos, segundo Jenkins

et al. (1993), é a GALO (*Gordona Amarae-like organism*) a predominante, enquanto que Madoni et al. (2000) e Richard (1989) citam a *Nocardia sp.*

Os métodos clássicos para a quantificação das bactérias filamentosas baseiam-se em uma contagem manual com auxílio de um microscópio óptico com uma ocular dotada de micrômetro. Sezgin et al. (1978) desenvolveram um procedimento para medir o comprimento total das bactérias filamentosas, o qual foi utilizado posteriormente por Palm et al. (1980) e Lee et al. (1982). Este procedimento divide o resultado em oito classes segundo a abundância das bactérias filamentosas. Jenkins et al. (1993) desenvolveu uma outra técnica para quantificar a *Nocardia sp.*

Estas técnicas manuais, além de imprecisas, são cansativas, repetitivas e tomam bastante tempo, o que torna a sua utilização nas estações de tratamento muito trabalhosa. Por exemplo: é difícil dentro destas condições detectar o início de um episódio de intumescimento do lodo ou controlar a adição do agente desinfetante (como o cloro). Vários autores têm desenvolvido procedimentos utilizando a análise de imagem para caracterizar a morfologia dos flocos, sobretudo em termos de sua dimensão fractal, para correlacioná-la com suas propriedades de decantação (Grijpspeerdts and Verstraete, 1996, 1997).

A análise de imagem aparenta ser um bom método para caracterizar a morfologia dos flocos e ao mesmo tempo quantificar a presença das bactérias filamentosas. Um procedimento que realize tais quantificações poderia facilitar a operação das estações de tratamento de efluentes e melhorar a sua performance. Tal método foi proposto por Da Motta et al. (1999, 2000) e utilizado para monitorar o desenvolvimento das bactérias filamentosas e caracterizar os flocos em instalações piloto aeróbias (Da Motta

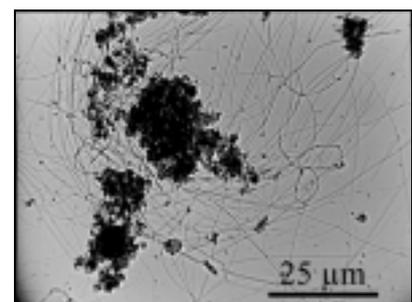
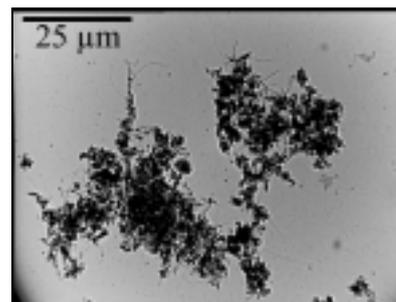


Figura 1 - Imagem de um floco em estado normal (a) e em estado de bulking filamentososo (b)

et al, 2001a) e anaeróbias (Alves et al., 2000). Neste artigo serão apresentados os resultados de uma validação deste procedimento em 12 estações de tratamento de esgotos situadas na França e em Portugal e em seguida um acompanhamento do funcionamento da estação de tratamento de esgotos de Braga (Portugal).

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras nas estações de tratamento de Nancy, Metz, Pont-à-Mousson, Damelevière, Dombasle, Toul e Liverdun na região da Lorraine e nas estações de Isle-sur-Vienne e Aix-Sur-Vienne no Limousin na França e nas estações de Braga, Caminha e Gelfa na região do Minho em Portugal. A Figura 2 apresenta fotos de algumas das estações analisadas. Pode-se assim analisar estações de tratamento de efluentes por lodos ativados de tamanhos, projetos e localizações (clima e hábitos populacionais) diferentes. As amostras foram coletadas na saída do tanque de aeração e encaminhadas aos laboratórios para a realização dos testes físico-químicos e da análise de imagem. O tempo entre a coleta e o início das análises foi inferior a uma hora para evitar modificações na microfauna e mudança na estrutura dos flocos bacterianos.

## Análises físico-químicas

A concentração de biomassa (lodo ativado) no tanque de aeração foi medida em termos de sólidos suspensos totais (SST) e do percentual de sólidos suspensos voláteis (%SSV).

Para calcular-se os SST, tomou-se uma amostra de 50 ml e deixou-se centrifugar durante 15 minutos a 3000 rpm. Em seguida desprezou-se o sobrenadante e transferiu-se a biomassa para uma cápsula de porcelana pré-tarada, a qual foi posta em um forno a 105 °C durante 12 horas. Após a pesagem para obtenção dos SST, a cápsula foi posta em uma mufla a 550 °C durante 2 horas a fim de se obter os sólidos suspensos voláteis (SSV). O percentual de sólidos suspensos voláteis (%SSV) é calculado segundo a equação 1, apresentada abaixo:

$$\% \text{SSV} = 100 \times \frac{\text{SST}}{\text{SSV}} \quad (1)$$

Utilizando-se uma coluna cilíndrica de acrílico de 10 L (para evitar os efeitos de parede que ocorrem quando da utilização de uma proveta de 1 ou 2 litros), foi obtida a curva de decantação acompanhando-se a evolução da frente de decantação (interface líquido/biomassa) em função do tempo, durante pelo me-

nos 30 minutos. Os dados foram analisados de acordo com a teoria de Kynch (1952). A velocidade de decantação ( $v$ ) é obtida a partir de uma regressão linear dos pontos obtidos na zona de queda livre (trecho reto da curva de decantação após a refloculação inicial), onde não há influência da compressão. O Índice Volumétrico de Lodos (IVL) ou "Sludge Volume Index" (SVI) é então calculado segundo Equação 2.

$$\text{SVI} = \frac{H_{30}}{H_i \times \text{SST}} \quad (2)$$

onde  $H_i$  e  $H_{30}$  são respectivamente as alturas inicial e final, após 30 minutos de decantação. Em alguns casos, devido à má decantabilidade das lodos, foi necessário realizar uma diluição.

## Aquisição das imagens

Para a aquisição das imagens utilizou-se um sistema formado por uma câmera de vídeo monocromática Hitachi CCTV modelo HV-720(E) (Tóquio, Japão), fixada sobre um microscópio ótico Leitz Dialux 20 (Wetzlar, Alemanha) e conectada a um microcomputador por meio de uma placa de aquisição de vídeo Matrox (Quebec, Canadá). O presente sistema é apresentado na Figura 3.



(a) Dombasle



(b) Nancy-Maxéville



(c) Damelevières



(d) Pont-à-Mousson

Figura 2 – Imagens de algumas das estações de tratamento de esgotos analisadas.

Inicialmente deposita-se uma gota da amostra coletada na estação sobre uma lâmina de vidro, a qual é posteriormente recoberta por uma laminula. Em seguida, coloca-se a lâmina sobre o microscópio ótico e faz-se a aquisição de 70 imagens a uma ampliação de 100x. O procedimento para a preparação da amostra e para a aquisição das imagens, apresentado em Da Motta (2001), deve ser seguido meticulosamente, a fim de evitar erros importantes nos resultados da análise. As imagens são em seguida analisadas automaticamente através de programas de tratamento e análise de imagens desenvolvidos em Visilog 5 (Les Ulis, France).

## PROGRAMA FLOCMORPH

Para a análise mesoscópica, utilizou-se o programa *FlocMorph* (Da Motta et al., 2001) para realizar o tratamento e obter as informações das imagens. As principais etapas deste programa são as seguintes: a partir da imagem inicial (Figura 4a), realiza-se um pré-tratamento composto de duas equalizações do histograma (uma geral seguida de uma local) e uma supressão do fundo da imagem a fim de minimizar o gradiente formado por uma iluminação não uniforme e realçar os flocos e filamentos (Figura 4b). Em seguida realiza-se uma binarização automática da

imagem, ou seja, passa-se de 256 tons de cinza a dois (branco e preto) (Figura 4c). Esta binarização é feita baseando-se na variância do histograma dos tons de cinza da imagem.

A partir desta imagem binária deve-se separar os filamentos dos flocos. Para tanto, retira-se então os núcleos de flocos através de uma operação de erosão e subtração lógica (Figura 4d).



Figura 3 – Sistema de aquisição de imagens

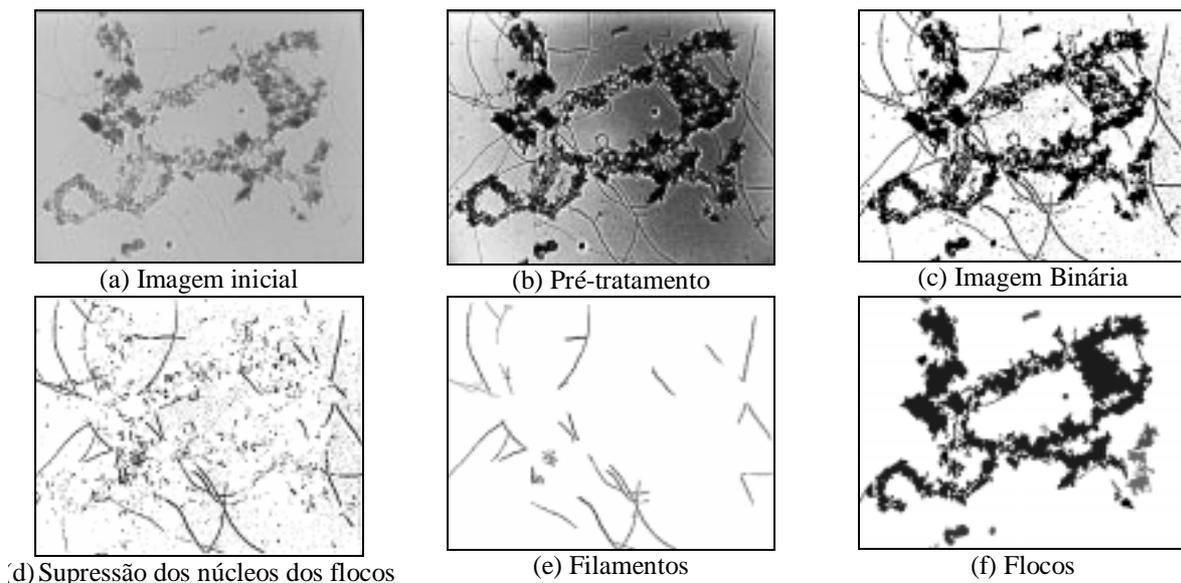


Figura 4 – Principais etapas do programa *FlocMorph*.

A diferenciação entre os filamentos, resíduos e fragmentos de flocos se faz a partir do raio de giro, que é calculado a partir da Equação 4.

$$r_g = \frac{\sqrt{M_{2X} + M_{2Y}}}{D_{eq}/2} \quad (4)$$

onde:  $D_{eq}$  é o diâmetro equivalente dos flocos e  $S_f$  sua superfície projetada.

$$D_{eq} = 2\sqrt{\frac{S_f}{\pi}} \quad (5)$$

$M_{2X}$  e  $M_{2Y}$  os momentos de ordem 2

$$M_{2X} = \frac{1}{S} \sum (x_i - M_{1X})^2 \quad (6)$$

$$M_{2Y} = \frac{1}{S} \sum (y_i - M_{1Y})^2 \quad (7)$$

e  $M_{1X}$  e  $M_{1Y}$  os momentos de ordem 1.

$$M_{1X} = \frac{1}{S} \sum x_i \quad (8)$$

$$M_{1Y} = \frac{1}{S} \sum y_i \quad (9)$$

onde  $(x_i, y_i)$  representa as coordenadas de um ponto do objeto na imagem.

Obtém-se então uma imagem apenas com os filamentos (Figura 4e), onde é calculado o número de elementos filamentosos ( $N_f$ ), assim como o comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ). Com os filamentos identificados, faz-se uma subtração para eliminá-los da imagem em que estão junto com os flocos e uma limpeza para eliminar os pequenos resíduos oriundos do tratamento da imagem ou de sujeiras, através de uma operação de erosão seguida de uma reconstrução da imagem. Enfim tem-se uma imagem apenas com os flocos que são etiquetados e seus parâmetros morfológicos calculados.

A Figura 5 apresenta algumas imagens iniciais típicas (em tons de cinza) e imagens binárias (em preto e branco) de filamentos e flocos. Mesmo sem ter sido realizada uma análise com corantes, as espécies de bactérias das Figuras 5a e 5b são provavelmente diferentes. As imagens dos lodos ativados da Figura 5 contêm 13% (5a) e 64% (5b) de bactérias filamentosas (calculada em termos de área projetada).

### PARÂMETROS CALCULADOS PELO PROGRAMA FLOCMORPH

Os filamentos são caracterizados pelo seu número ( $N_f$ ) e comprimento total ( $L_f$ ) por imagem. O comprimento total é medi-

do a partir do esqueleto do filamento. O esqueleto, obtido a partir da superfície projetada do filamento, é uma linha de um pixel (unidade elementar da imagem) de largura que percorre a extensão do filamento.

Para os flocos são calculados: superfície projetada total dos objetos ( $S_t$ ), superfície projetada total dos flocos ( $S_f$ ), superfície projetada dos flocos ( $S_p$ ) e dimensão fractal dos flocos ( $D_f$ ). A partir da superfície projetada, obtém-se o diâmetro equivalente pela equação 10.

$$D_{eq} = 2\sqrt{\frac{S_f}{\pi}} \quad (10)$$

Existem várias maneiras de se calcular a dimensão fractal de um objeto (Li et Ganczarzyk, 1989; Kaye, 1992; Kaye et al., 1992). O método proposto por Russ (1995), baseado na distância euclidiana, foi escolhido devido à sua robustez em relação a precisão do contorno (Da Motta et al., 2001).

Este procedimento de análise é completamente automático, a partir das imagens adquiridas, e não necessita de nenhum operador, que se restringirá à aquisição das imagens, respeitando as regras da mesma. Os resultados obtidos são armazenados em arquivos ASCII que podem ser importados por uma planilha de cálculo.

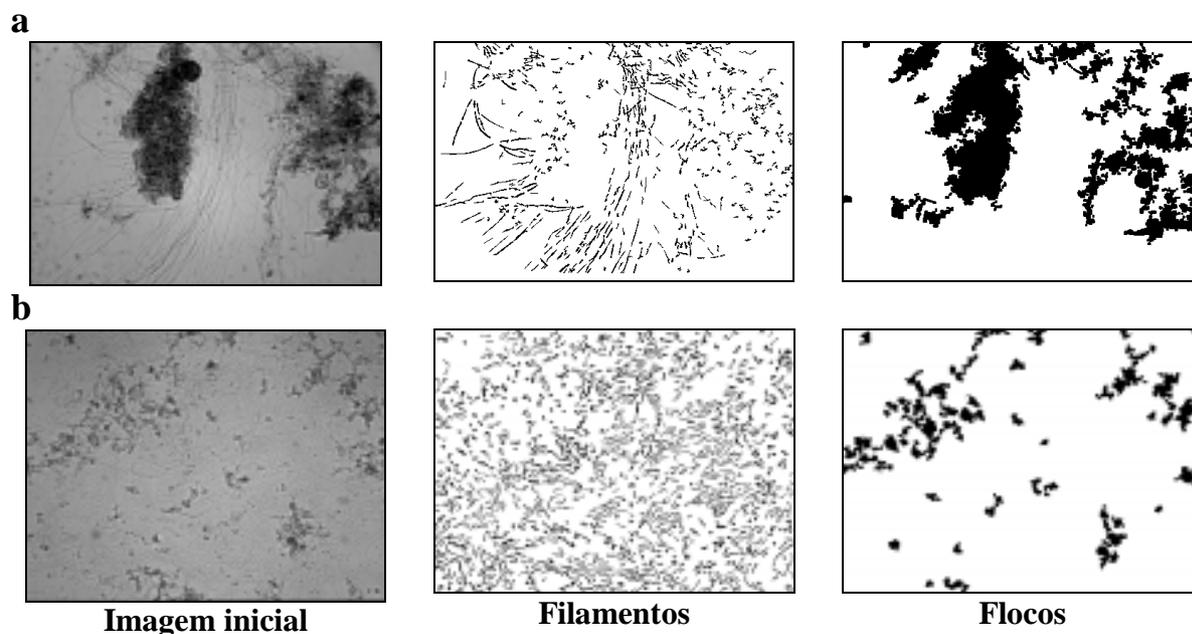


Figura 5 - Exemplos de resultados finais de tratamento de imagens

## RESULTADOS

### Validação preliminar

A partir de medidas efetuadas sobre os flocos, é possível definir além da dimensão fractal (que caracteriza a rugosidade) vários outros descritores morfológicos tais como: fatores de alongamento calculados a partir dos diâmetros, circularidade ou perímetro. Foi decidido limitar-se a um só descritor morfológico, a dimensão fractal, após uma análise dos coeficientes de varia-

ção intra e inter amostras.

A fim de validar a utilização do método de quantificação por análise de imagem aqui proposto, foram realizados inicialmente testes de reprodutibilidade. Os testes foram realizados com vários operadores diferentes, efetuando uma análise de uma mesma amostra e com um operador realizando duas análises sucessivas de uma mesma amostra. Pode-se observar que, de uma maneira geral, os erros cometidos quando se tem vários operadores são maiores que aqueles cometidos por

um só operador. Estas experiências, assim como as primeiras realizadas com um só operador, foram realizadas antes que o protocolo de análise tivesse sido realizado e implantado (Tabela 1).

Os parâmetros mais sensíveis à desatuação do operador são o comprimento e o número total de filamentos por imagem (Figura 6). O diâmetro equivalente dos flocos e a superfície total por imagem são os mais robustos.

A maneira de preparar as amostras e as condições de aquisição (sobretudo a iluminação) podem provocar erros superiores a 50%. A partir da amostra 11 um procedimento detalhado foi posto em prática (Da Motta, 2001). Através de um acompanhamento rigoroso deste procedimento de preparação da amostra e do controle dos parâmetros de aquisição, desvios-padrão inferiores a 5% são obtidos.

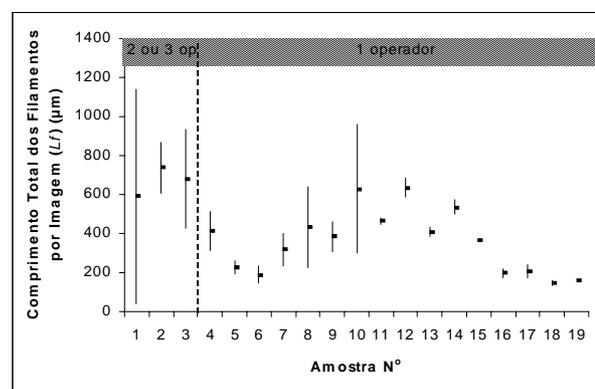
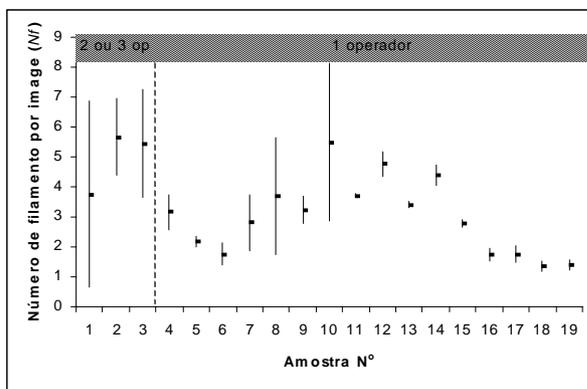
### Validação em várias estações

Esta campanha de análise em várias estações foi realizada de 27 de Abril a 26 de Junho de 2000. Os resultados obtidos por análise de imagem dos flocos bacterianos são apresentados na Tabela 2. Os valores apresentados são valores médios obtidos de duas séries de 72 imagens.

Foi observada em todas as estações, exceto na de Nancy-Maxéville, uma presença muito forte de bactérias filamentosas, indicando o fenômeno de intumescimento do lodo ou de formação de espuma. Na estação de Braga, por exemplo, se trata de uma proliferação de bactérias filamentosas, com uma predominância da espécie Tipo 1863. Para a estação de Caminha, houve um problema na análise relativa à estrutura dos flocos bacterianos. Foram observados

**Tabela 1 - Valores máximos (Max) e médios (Med) do coeficiente de variação (CV) da: superfície total por imagem ( $S_t$ ), superfície total dos flocos por imagem ( $S_{tf}$ ), número total de filamentos por imagem ( $N_f$ ), comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ), superfície média dos flocos por imagem ( $S_f$ ), diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) e dimensão fractal dos flocos ( $D_f$ ), entre duas análises sucessivas sobre uma mesma amostra (1 op) e entre os resultados das análises de vários operadores sobre uma mesma amostra (+ op).**

	$S_t$ (%)	$S_{tf}$ (%)	$N_f$ (%)	$L_f$ (%)	$S_f$ (%)	$D_{eq}$ (%)	$D_f$ (%)
Max (1 op)	11.43	22.62	53.17	52.58	20.15	6.93	2.69
Med (1 op)	3.03	5.90	17.20	17.25	7.88	3.39	1.00
Max (+ op)	18.47	61.10	82.81	92.92	13.55	8.14	3.05
Med (+ op)	14.07	38.68	46.25	49.35	7.26	5.45	2.90



**Figura 6 - Valores médios e desvios-padrão do número total de filamentos ( $N_f$ ) e do comprimento total de filamentos ( $L_f$ ) por imagem, para uma análise de dois ou três operadores (amostra 1 - 3 operadores; amostras 2 e 3 - 2 operadores) e para duas análises sucessivas de uma mesma amostra (amostras 4 a 19)**

grandes flocos muito escuros (muito densos) e pequenos flocos muito claros. O programa interpretou estes pequenos flocos como se fossem filamentosas. Na realidade, nesta estação havia uma quantidade normal de filamentosas e a decantação estava muito boa. Esta é uma das limitações do programa *FlocMorph*, que foi posta em evidência com este estudo.

Na estação de Nancy-Maxéville, assim como na de Caminha, foi constatado um bom equilíbrio entre as bactérias filamentosas e zoogleais, formando assim flocos sãos, com boas características de decantabilidade.

A Figura 7 apresenta a variação do diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) em função do número de filamentos por imagem ( $N_f$ ) para o conjunto das observações realizadas. Pode-se constatar, a partir desta figura, que o diâmetro diminui com o aumento do número de filamentos. Isto pode ser explicado pelo

consumo de substrato pelas bactérias que estão no meio líquido, reduzindo assim a disponibilidade do substrato para as que se encontram nos flocos.

A partir da observação da Figura 8, pode-se constatar que a dimensão fractal, que dá uma idéia da rugosidade do floco, aumenta com o número de filamentos e diminui quando o diâmetro dos flocos aumenta. O excesso de filamentos (bactérias filamentosas) e/ou redução do diâmetro equivalente induzem a formação de flocos mais irregulares. Se há menos bactérias filamentosas no exterior dos flocos (parâmetro medido por *FlocMorph*), haverá mais substratos disponíveis para as bactérias que se encontram nos flocos. Desta maneira, os flocos serão maiores e mais resistentes, porém serão "alisados" no ambiente turbulento do tanque de aeração (Da Motta et al., 2001c).

Inversamente, quando há um excesso de bactérias filamentosas no meio

líquido, os flocos tornam-se mais frágeis e se fragmentam, produzindo estruturas mais rugosas. As bactérias filamentosas podem também se desenvolver na superfície exposta dos flocos e contribuir assim para o aumento da sua rugosidade.

Os resultados das análises dos sólidos suspensos totais (SST), da porcentagem de sólidos suspensos voláteis (%SSV) e dos parâmetros de decantabilidade são apresentados na Tabela 3. Para obter a curva de decantação, foi necessário diluir a amostra de lodo ativado (licor misto) de 9 das 12 estações analisadas. Para tanto, foi utilizado sempre que possível água da saída do decantador secundário (clarificador). Esta precaução é realizada a fim de evitar que a estrutura dos flocos não seja muito deformada pela variação da pressão osmótica provocada pela adição de água potável.

Ao observar-se os valores do índice volumétrico de lodos (IVL), verificam-se em alguns casos, baixos valores para lodos que não decantam bem (fração  $H_{30}/H_1$  elevada). Isto é devido a lodos altamente concentrados. Nestes casos, o mais correto é utilizar o índice volumétrico de lodos diluído (IVLd). Os valores do índice volumétrico de lodos diluído apresentados na Tabela 3 não foram obtidos seguindo-se a metodologia citada na literatura ( $H_{30}/H_1 < 0,25$ ), pois não se dispunha de um volume suficiente de água intersticial ou tratada (saída do clarificador).

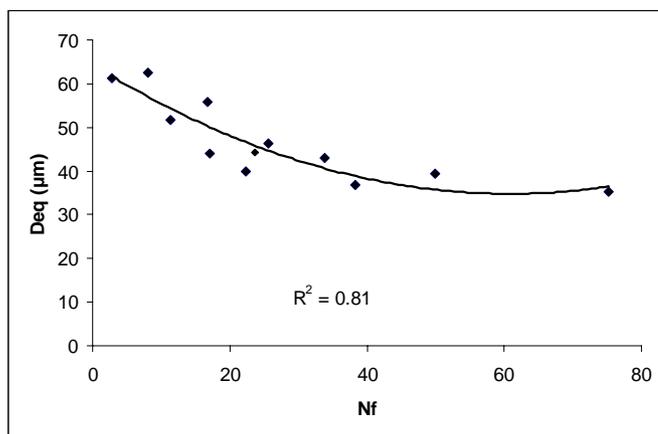


Figura 7 – Correlação entre o número de filamentos por imagem ( $N_f$ ) e o diâmetro equivalente dos flocos bacterianos ( $D_{eq}$ )

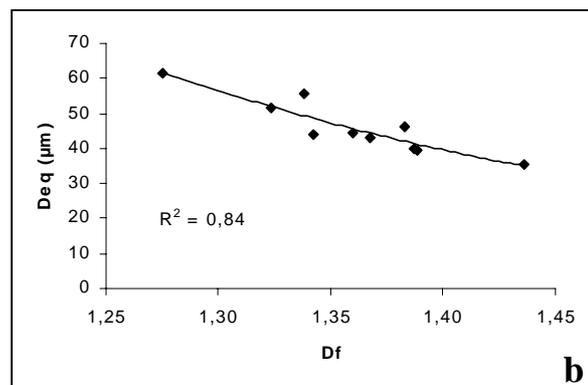
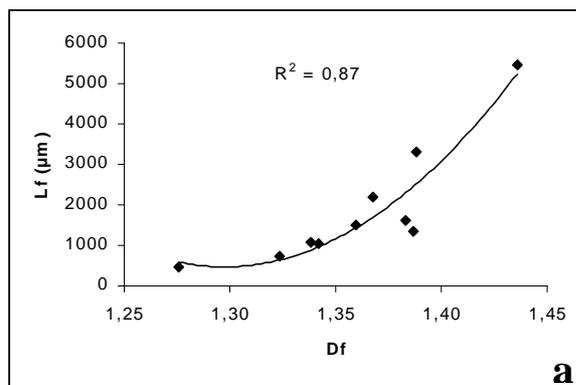


Figura 8 – Correlação entre a dimensão fractal ( $D_f$ ) e o comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ) (a) e entre a dimensão fractal ( $D_f$ ) e o diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) (b).

**Tabela 3 – Resultados da análise físico-química dos flocos bacterianos: sólidos suspensos totais (SST); porcentagem de sólidos suspensos voláteis (% SSV); índice volumétrico de lodos concentrado (IVL); índice volumétrico de lodos diluído (IVLd); fração decantada após 30 minutos ( $H_{30}/H_i$ ) e velocidade de decantação ( $v$ ).**

Estação N°	SST (g/L)	% SSV	SVI (mL/g)	$H_{30}/H_i$ (Conc)	diluição	SVId (mL/g)	$H_{30}/H_i$ (Dil.)	$v$ (m/h)
1	3.8	64.5	238	0.91	1:2	161	0.31	2,57
2	4.8	63.6	201	0.97	2:5	153	0.47	1,13
3	10.4	59.5	94	0.97	1:2	90	0.47	1,33
4	1.7	74.6	133	0.22	n.d.	133	0.22	3,77
5	2.5	84.5	399	0.99	1:2	372	0.46	1,44
6	2.8	75.9	330	0.92	1:2	234	0.33	2,55
7	3.2	72.7	88	0.28	n.d.	88	0.28	n.c.
8	4.6	n.c.	215	0.99	1:4	307	n.c.	n.c.
9	7.2	n.c.	136	0.98	1:2	271	n.c.	n.c.
10	5.0	69.3	196	0.97	1:2	175	0.42	1,15
11	3.1	64.1	157	0.49	n.d.	157	0.49	1,73
12	9.5	69.1	100	0.96	1:4	136	0.34	2,42

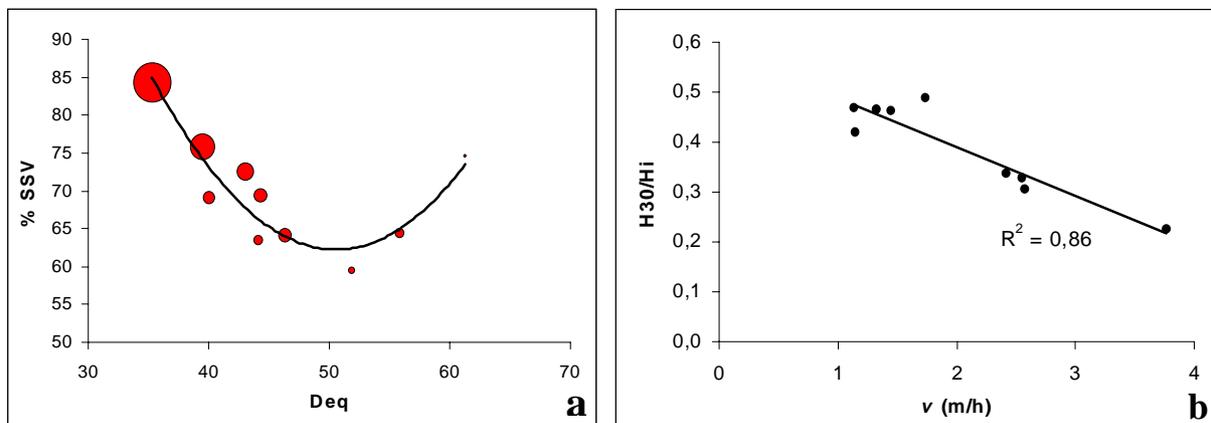
n.d. = não diluído n.c. = não conhecido

Pode-se considerar, sem muito erro, que a quantidade de sólidos suspensos voláteis representa a quantidade de matéria orgânica. A matéria orgânica dos flocos é constituída em sua maior parte por exopolímeros e pelas bactérias formadoras de flocos e filamentosas (os outros microorganismos encontram-se em concentrações mais baixas). Uma porcentagem de sólidos suspensos voláteis mais alta pode também

ser um indicador de flocos maiores e/ou de uma concentração mais importante de filamentosas, como nos mostra a correlação da Figura 9a.

A correlação obtida entre a velocidade de decantação dos flocos na região de queda livre (sem interferência da compressão dos flocos) e a fração decantada, confirma os resultados obtidos por Da Motta et al. (2001b) para o acompanha-

mento da estação de Nancy-Maxéville. Neste trabalho foi demonstrado que a fração decantada fornece uma melhor aproximação da velocidade de decantação que o índice volumétrico de lodos. Foi obtido um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0.86, utilizando-se os dados das 9 estações após a diluição.



**Figura 9 - Correlação entre o diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ), a porcentagem de sólidos suspensos voláteis (%SSV) e o número de filamentos por imagem (representado pelo tamanho do círculo) (a) e entre a velocidade de decantação ( $v$ ) e a fração decantada após 30 minutos  $H_{30}/H_i$  (b).**

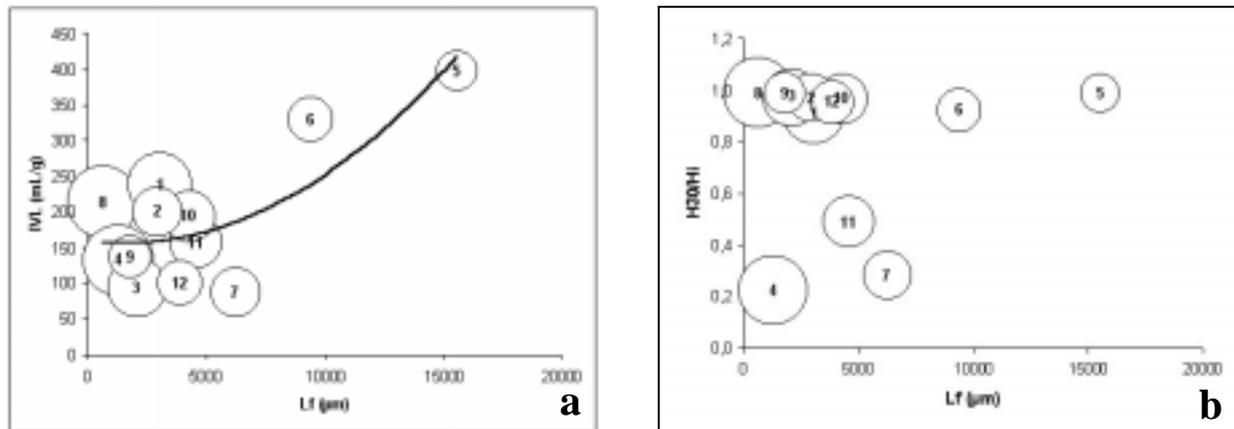


Figura 10 – Correlação entre: a) o comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ), o índice volumétrico de lodos (IVL) e o diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) e b) o comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ), a fração decantada após 30 minutos ( $H_{30}/H_1$ ) e o diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) (o tamanho do círculo é proporcional ao  $D_{eq}$  e o número circunscrito indica a estação).

A utilização do índice volumétrico de lodos (IVL) para lodos muito concentrados ou com muitas bactérias filamentosas dificultou a correlação entre o índice volumétrico de lodos (SVI) e o número de filamentos por imagem (Nf). Pode-se ver também que, neste caso, a utilização do índice volumétrico de lodos (IVL) não traduz sempre a qualidade de decantação. Observa-se na Figura 10a que a estação n°3 tem um índice volumétrico de lodos (IVL) baixo, indicando uma boa decantabilidade. Todavia ao observar-se a Figura 10b, constata-se que este lodo praticamente não decanta (relação  $H_{30}/H_1$  grande). Estes dois parâmetros ( $H_{30}/H_1$  e índice volumétrico de lodos) devem ser, então, analisados em conjunto para poder se estimar a qualidade da decantação dos flocos.

### Acompanhamento da Estação de Braga

Os resultados aqui apresentados foram obtidos de amostras coletadas na estação de tratamento de efluentes de Braga (ETAR de Frossos) durante o período de 22 de Maio a 09 de Junho de 2000.

Pode-se observar, pela Figura 11a, que não houve descarte de lodo até o início do mês de Junho, devido às fortes chuvas que atingiram a região. Nesta mesma época houve uma redução das precipitações e consequentemente, do caudal de entrada da estação.

Ao observar-se a evolução dos SST, vê-se entre os dias 24 e 25 de Maio uma forte redução de sua concentração ocasionada pela

perda de biomassa pelo clarificador. Esta perda ocorreu devido a uma predominância de bactérias filamentosas que fez a biomassa intumescer (“bulking”) e transbordar, saindo junto com a água tratada. A forte presença destas bactérias também pode ser observada pela concentração elevada de sólidos suspensos voláteis (86 % em média).

A Figura 12a mostra a variação do IVL concentrado e após diluição (1:1) ao longo do acompanhamento da estação. Nos primeiros dias há um aumento da fração  $H_{30}/H_1$ , devido a um aumento do número de filamentos, Figura 12b. O valor do IVL para este período diminuiu, indicando aparentemente um decréscimo das filamentosas. Este falso resultado foi obtido devido ao aumento dos SST.

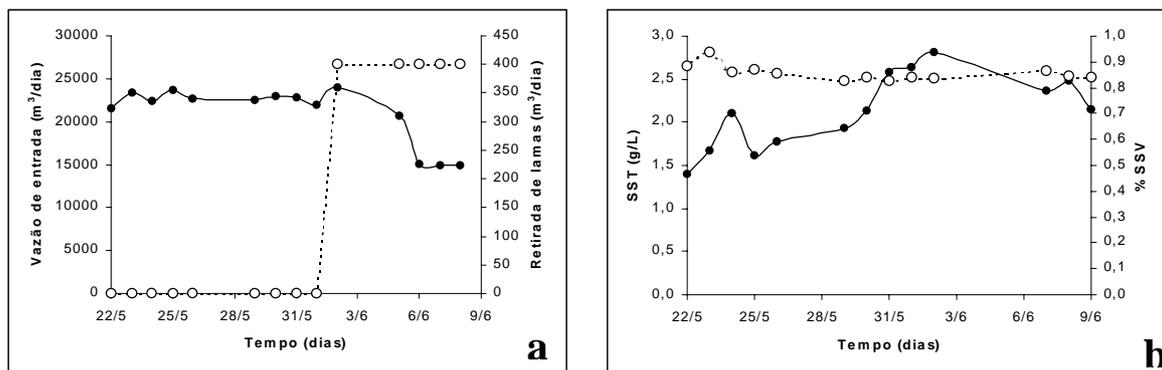


Figura 11 - Variação da vazão de entrada de efluentes na estação de tratamento (●) e de retirada de lodo (○) (a) sólidos suspensos totais (SST) (●) e porcentagem de sólidos suspensos (%SSV) (○) (b) em função do tempo.

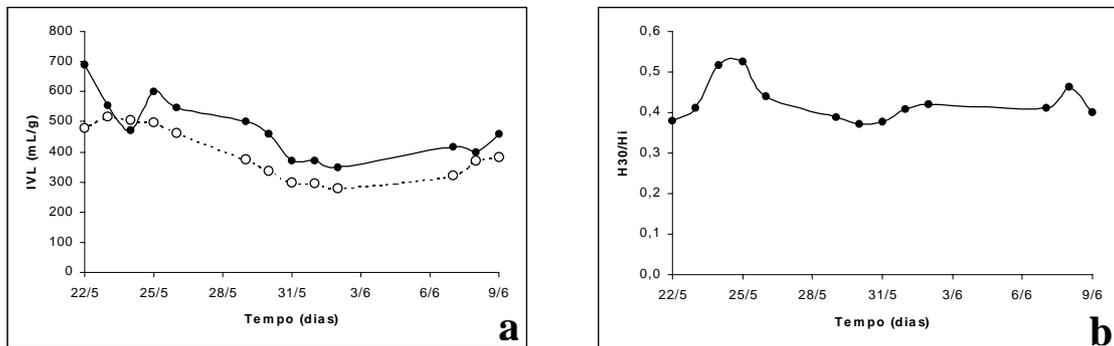


Figura 12 - Variação do índice volumétrico de lodos (IVL) concentrado (●) e diluído (o) (a) e da fração  $H_{30}/H_1$  após diluição (b) em função do tempo.

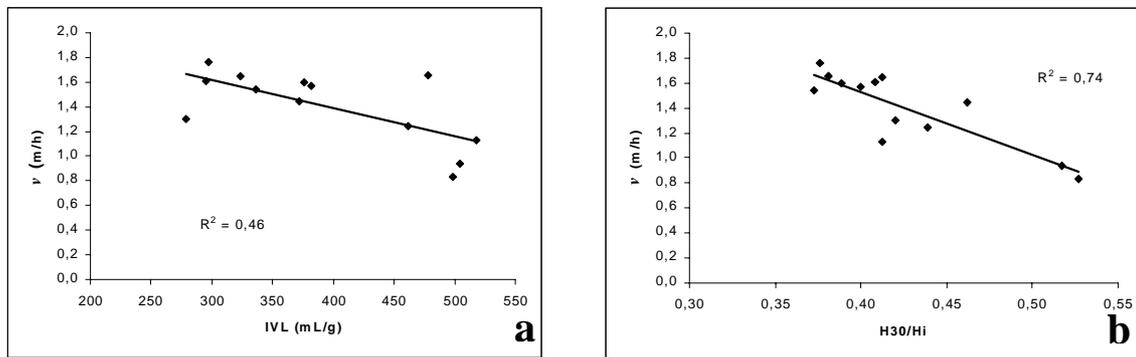


Figura 13 – Correlação entre a velocidade de decantação ( $v$ ) e o índice volumétrico de lodos (IVL) (a) e entre  $v$  e a fração  $H_{30}/H_1$  após diluição (b).

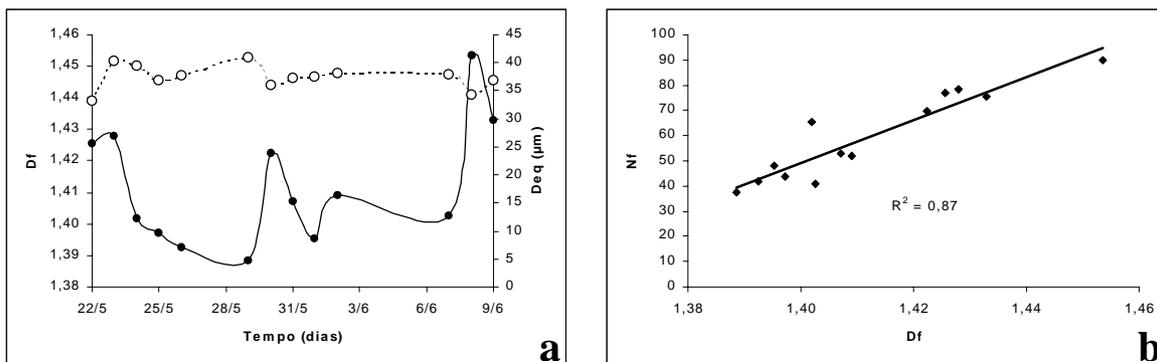


Figura 14 – Variação da dimensão fractal ( $D_f$ ) (●) e do diâmetro equivalente ( $D_{eq}$ ) (o) em função do tempo (a) e a correlação entre  $D_f$  e  $D_{eq}$  (b).

Foi também observada uma correlação mais importante da velocidade de queda livre ( $v$ ) com a fração decantada ( $H_{30}/H_1$ ) que com o índice volumétrico de lodos (IVL), Figura 13.

Os resultados obtidos por análise de imagem dos flocos bacterianos permitiram constatar que o diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ) não sofreu grandes variações durante o período estudado. O mesmo não ocorreu com a dimensão fractal, conforme pode ser observado na figura 14a.

As fortes variações da dimensão fractal são devidas às variações do número e/ou comprimento total dos filamentos, Figura 14a. Foi verificada uma forte correlação entre estes parâmetros, conforme pode ser visto pela Figura 14b. De fato, em estudo realizado com lodos de várias estações (seção 3.2), observou-se que a dimensão fractal é função do comprimento total (ou número) dos filamentos ( $L_f$  ou  $N_f$  respectivamente) e do diâmetro equivalente dos flocos ( $D_{eq}$ ). A influência do diâmetro só pode ser observada

com dados de estações diferentes; uma vez que em geral eles não variam muito em uma mesma estação.

Através da Figura 15a pode-se acompanhar a evolução do comprimento e número total de filamentos por imagem. A queda dos valores destes parâmetros na primeira semana deve-se provavelmente saída das bactérias filamentosas, junto com a água do decantador. Na segunda semana foi adicionado hipoclorito de sódio (3kg por tonelada de sólidos suspensos totais) com o intuito de reduzir ou elimi-

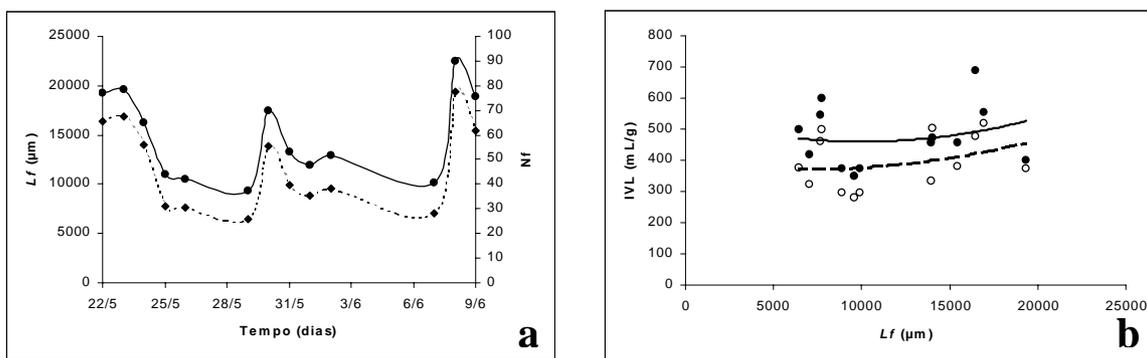


Figura 15 – Variação do comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ) (●) e do número de filamentos ( $N_f$ ) (◆) em função do tempo (a) e correlação entre o IVL concentrado(●) e diluído(o) e o comprimento dos filamentos (b)

nar o intumescimento do lodo. Como pode ser visto, houve uma redução, mas a concentração do hipoclorito não foi suficiente. Com a suspensão da adição houve um novo aumento de concentração das mesmas.

Como o “bulking” esteve presente na estação durante todo o período de acompanhamento, não foi possível obter uma correlação entre o IVL (ou  $H_{30}/H_l$ ) com o comprimento total dos filamentos por imagem ( $L_f$ ) que fosse satisfatória, Figura 15b. Para ambos os casos (IVL e  $H_{30}/H_l$ ) obtiveram-se coeficientes de correlação abaixo de 10%. A utilização do IVL diluído seria o mais indicado.

## CONCLUSÕES

O procedimento para a quantificação de bactérias filamentosas e cálculo dos parâmetros morfológicos dos flocos bacterianos (*FlocMorph*) apresenta-se como uma excelente ferramenta para melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem no interior do tanque de aeração em relação à biomassa bacteriana. A utilização de uma metodologia precisa para a preparação das amostras e aquisição das imagens permite obter resultados com erros inferiores a 5%. Este procedimento automático é baseado em imagens que têm sua aquisição voluntariamente simplificada (estado fresco, sem coloração, entre lâmina e lamínula).

Foi constatado que mais de 80% das estações estudadas tinham problemas ligados à presença excessiva de bactérias filamentosas. Isto mostra a importância do desenvolvimento e do ajuste de tal procedimento. A análise de diferentes estações de tratamento de efluentes permitiu verificar a influência do tamanho dos flocos, através do seu diâmetro equivalente, sobre o índice volumétrico de lodos e sobre a dimensão fractal dos flocos.

Os primeiros resultados obtidos no estudo de diversas estações mostraram também que a porcentagem dos sólidos suspensos voláteis, o diâmetro equivalente dos flocos e o número de filamentos por imagem podem ser bons indicadores da formação de flocos sãos, em relação à sua decantabilidade. Estes flocos são caracterizados por um bom equilíbrio entre as bactérias zoogleais (formadoras de flocos) e as bactérias filamentosas.

O acompanhamento da estação de tratamento de Braga permitiu validar o programa *FlocMorph* para condições extremas de concentração de bactérias filamentosas, com filamentos de baixa espessura, assim como confirmar algumas correlações. A utilização do índice volumétrico de lodos diluído (IVLd) mostrou-se melhor que a utilização do IVL. Pode-se observar alguns fenômenos, como a redução das bactérias filamentosas após a adição do hipoclorito de sódio. Infelizmente a estação esteve durante todo o período com um excesso de filamentosas, o que impossibilitou a realização de uma correlação entre o IVL (ou IVLd) e o comprimento total dos filamentos ( $L_f$ ).

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Brasil), ao ICCTI (Portugal), à Embaixada da França em Portugal, às prefeituras das cidades francesas de Nancy, Toul, Metz, Damelevière, Dombasle, Pont-à-Mousson, Isle-sur-Vienne e Aix-sur-Vienne e às câmaras municipais das cidades portuguesas de Braga e Caminha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.M., et al. *Characterisation by image analysis of anaerobic microbial aggregates under*

*shock conditions*. Water Science and Technology, v. 41, n.12, p. 207-214, 2000.

DA MOTTA, M., et al. *Analyse des Floccs Bactériens et de la Microfaune des Boues Activées par Analyse d'image*, In: 3<sup>EME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL L'EAU ET SA RÉUTILISATION, Toulouse (França), p.321-326, 1999.

DA MOTTA, et al. *Automated monitoring of activated sludge using image analysis*, In: 1<sup>ST</sup> WORLD WATER CONGRESS OF THE INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION, Paris (France), Anais em CD, 2000.

DA MOTTA, M. *Applications de l'analyse d'image à la caractérisation de la microfaune de stations d'épuration des eaux usées*, Tese de Doutorado do Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, França, 2001.

DA MOTTA, M., PONS, M.N., ROCHE, N. *Automated monitoring of activated sludge in a pilot plant using image analysis*, Water Science and Technology, v. 43, n. 7, p. 91-96, 2001a.

DA MOTTA, M., PONS, M.N., ROCHE, N. *Characterization of activated sludge by automated image analysis*, Biochemical Engineering Journal, v. 9, n. 3, p.165-173, 2001b.

DA MOTTA, M., et al. *Characterisation of activated sludge by automated image analysis: validation on full-scale plants*, In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS IN BIOTECHNOLOGY (CAB8), Québec (Canada), p.452-456, 2001c.

DUCHÈNE, P., COTTEUX, E., *La problématique des dysfonctionnements biologiques: bulking et moussage biologique en boues activées*, Tribune de l'Eau, v. 59, n. 5, p. 59-66, 1988.

GRUISPEERDT, K., VERSTRAETE, W. *A sensor for the secondary clarifier based on image analysis*, Water Science and Technology, v. 33, n. 1, p. 61-70, 1996.

GRUISPEERDT, K., VERSTRAETE, W. *Image analysis to estimate the settleability and concentration of activated sludge*, Water Research, v. 31, n. 5, p. 1126-1134, 1997.

JENKINS, D., RICHARD, M.G., DAIGGER, G.T. *Manual on the causes and control of activated*

*sludge bulking and foaming*, Lewis Publishers, 2<sup>nd</sup> Edition, Michigan, 1993.

KAYE, B.H. *Characterizing the structure of fumed pigments using the concepts of fractal geometry*, Part. Part. Syst. Charact., v. 8, p. 63-71, 1991.

KAYE B.H., CLARK G.G. AND LIU Y. *Characterizing the structure of abrasive fine particles*. Part. Part. Syst. Charact., v. 9, p. 1-8, 1992.

KYNCH, G.J. *A theory of sedimentation*. Trans. Faraday Soc., v. 48, p. 621-629, 1952.

LEE, S-E, KOOPMAN, B.L., JENKINS, D. *The effect of aeration basin configuration on activated sludge bulking at low organic loading*. Water Science and Technology, v.14, p. 407, 1982.

LI, D.H. AND GANCZARCZYK, J. *Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes*. Environmental Science and Technology, v. 23, p. 1385-1389, 1989.

MADONI, P., DAVOLI, D., GIBIN, G. *Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated-sludge plants in Italy*. Water Research, v. 34, n. 6, p. 1767-1772, 2000.

PALM, J.C., JENKINS, D., PARKER, D.S. *Relationship between organic load, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely-mixed activated sludge process*. Journal of Water Pollution Control Federation, v. 54, p. 1087, 1980.

PUJOL, R., CANLER, J.P. Contact zone: *French practice with low F/M bulking control*. Water Science and Technology, v. 29, n. 7, p. 221-228, 1994.

RICHARD, M. *The bench sheet monograph on activated sludge microbiology*. The Water Pollution Control Federation, Virginia, 1989.

ROSSETTI, S., CARUCCI, A., ROLLE, E. *Survey on the occurrence of filamentous organisms in municipal wastewater treatment plants related to their operating conditions*. Water Science and Technology, v. 29, n. 7, p. 305-308, 1994.

RUSS, J.C. *The image processing handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, Boca Raton, 1995.

SEZGIN, M., JENKINS, D., PARKER, D. S. *A unified theory of filamentous activated sludge bulking*. Journal of Water Pollution Control Federation, v. 50, p. 362-381, 1978.

WANNER, J., et al. *A national survey of sludge separation problems in the Czech Republic: filaments, floc characteristics and activated sludge metabolic properties*. Water Science and Technology, v. 37, n. 4/5, p. 271-279, 1998.

WESTLUND, A.D., HAGLAND, E., ROTHMAN, M. *Bulking and foaming caused by Microthrix parvicella at three large sewage treatment plants in the Greater Stockholm area*. Water Science and Technology, v. 34, n. 5/6, p.281-287, 1996.

**Endereço para correspondência:**

**Maurício da Motta**  
**Universidade Federal de**  
**Pernambuco- Centro de**  
**Tecnologia e Geociências**  
**Dep. de Engenharia Química**  
**Av. Prof. Arthur de Sá, s/n**  
**50.740-521**  
**CEP: 50740-521**  
**Recife - PE**  
**Tel.: (81) 3271-8238**  
**Fax.: (81)3271- 0095/3271-3992**  
**E-mail: mottas@frevu.npd.ufpe.br**



**PROMOÇÃO/ORGANIZAÇÃO/REALIZAÇÃO: ABES/APRH/APESB**  
**NATAL - RN, 29/03 a 02/04/04**