

Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas

Evaluation of Particle Size Distribution in Hydro Collections

**André Luiz de Oliveira¹, Pamela Moreno², Ricardo Henrique de Andrade Dutra³, Marcelo de Júlio⁴
e Rodrigo Braga Moruzzi⁵**

^{1,3} Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil

andreoliveirafeciv@gmail.com; ricardoandradedutra@gmail.com

² Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita, Baurú, SP, Brasil

pmoreno.unesp@gmail.com

⁴ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. São Paulo, Brasil. In memoriam.

⁵ Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade. Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil

rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 16/09/14 - Revisado: 03/02/15 - Aceito: 14/08/15

RESUMO

O material particulado presente em coleções hídricas configura-se como um grande problema na gestão deste recurso. Estas partículas podem abrigar diversas substâncias nocivas, provocar diminuição da vida útil de reservatórios, diminuir a capacidade de transporte de sistemas de drenagem, entre outros. Além disso, grande parte de substâncias dissolvidas devem ser convertidas a partículas para posterior remoção em sistemas de tratamento, durante a separação sólido-líquido. Uma das medidas para entendimento dos processos aos quais se envolvem as partículas presentes na água, os problemas agregados e forma de tratamento, é o conhecimento de sua distribuição na suspensão uma vez que fenômenos como transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas são todos influenciados por esta distribuição. Neste sentido, este trabalho buscou avaliar a Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) de cinco conjuntos de amostras produzidas em laboratório a partir de ensaios conduzidos com a mesma água de estudo, variando-se as condições de obtenção das partículas (flocos). Foram produzidos conjuntos de partículas distintos e determinados os parâmetros representativos de sua distribuição de tamanho, por dois métodos: linearização função de DTP e integração da função de DTP. Ambos os métodos se mostraram ferramentas hábeis para reproduzir, a partir do parâmetro β representativo, a DTP original. A grande vantagem deste tipo de abordagem é a possibilidade de se representar por um único valor, e não mais um conjunto extenso de valores, o tamanho das partículas por faixas pré-determinadas. Além disso, pode ser possível relacionar este parâmetro com algum método de difração de luz que forneça em termo real, por meio da perturbação de sinal, a variação dos tamanhos das partículas presentes no meio.

Palavras Chave: Distribuição de Tamanho de Partículas. Parâmetro representativo da DTP. Coleções hídricas

ABSTRACT

Particles are present in several types of water collections and they constitute a major problem in the management of this resource. These particles can cause a sort of problems, such as: to retain harmful substances, to diminish reservoirs capacity, to reduce drainage systems capacity, among others. Moreover, much of dissolved substances must be converted to particles before removal, so that removing particles means removing most of harmful substances. In this context, the assessment of physical characteristics of particles is crucial for improving their removal. Thus, particle size distribution (PSD) is an important tool for physical and chemical removal process. This study aimed to evaluate the PSD of five sets of laboratory samples. The parameter of function which represents PSD was evaluated of two different modes: by Linearized and by integrated forms. Both methods were able to reproduce parameters of PSD. The use of a representative PSD parameter was possible, thus permitting to represent, by means of a single value, and no more by means of a set of values, the PSD in different ranges. Furthermore, it may be possible in future to relate the characteristic parameter with a light diffraction method which can provide real-time analysis.

Keywords: Particle size distribution. Representative parameters. Hydro collections

INTRODUÇÃO

A remoção de material particulado presente em água é uma preocupação recorrente em todas as áreas do saneamento. Grande parte dos contaminantes está presente na forma particulada, ou deve ser convertido em partículas, visando a separação sólido-líquido. Especificamente no campo da drenagem urbana, a preocupação com o amortecimento das vazões tem sido recentemente acompanhada da remoção de material particulado (URBONAS; STAHR, 1993; BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005; CANHOLI, 2005).

Muitos métodos de determinação da concentração de partículas presentes em uma suspensão são baseados em processos indiretos, como medida de turbidez, concentração de sólidos, DQO, etc. Conforme Santos et al. (2004) os fenômenos como transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas são todos influenciados pela distribuição de tamanho de partículas, de modo que o emprego da análise desta distribuição pode auxiliar na escolha e no aprimoramento de tecnologias de tratamento e na adoção de procedimentos operacionais apropriados. Isto se aplica a outros processos nos quais haja presença de sólidos em suspensão, floculentos ou discretos.

Geralmente, as partículas são descritas por um valor representativo de sua forma. Junker (2006) reporta que o tamanho das partículas é obtido com base em medições diretas de diâmetro, área ou volume, ou por meio do cálculo de um diâmetro equivalente assumindo uma forma esférica. A forma esférica é a única que pode ser representada por um único número. Existem várias expressões utilizadas para descrever o tamanho representativo de uma partícula em relação ao tamanho de uma esfera equivalente e alguns exemplos são apresentados a seguir. O diâmetro médio aritmético é dado pela Equação 1:

$$d_a = (\sum d_i)/n \quad (1)$$

Onde: n é o número total de partículas medidas e d_i o diâmetro da partícula i .

O diâmetro médio de Sauter, que relaciona a área e o volume da fase dispersa é dado pela Equação 2:

$$d_{32} = \sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2 \quad (2)$$

Onde: $n_i d_i^2$ é a área, $n_i d_i^3$ é o volume, d_{32} é o diâmetro de Sauter, n_i o número de partículas de diâmetro (representativo) d_i .

Este diâmetro é importante para quantificar os efeitos de transferência de massa. O diâmetro médio log-geométrico é calculado conforme Equação 3:

$$d_g = \sum n_i \log d_i / \sum n_i \quad (3)$$

Este diâmetro caracteriza a curva de distribuição log-normal de tamanho de partículas em um sistema. Outra expressão para cálculo do tamanho representativo é o diâmetro médio volumétrico, obtido quando o diâmetro equivalente é novamente calculado a partir do volume total das partículas, assumindo forma esférica de acordo com a Equação 4:

$$d_{30} = (\sum 6V_b/\pi)^{1/3} / n \quad (4)$$

Onde V_b é o volume total de partículas.

Existem diversas outras maneiras de ser representar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) de uma suspensão, entretanto, a escolha do parâmetro representativo deve ser feita com base no processo que se deseja descrever. Santos et al. (2004) destacam que cada técnica de determinação da distribuição de tamanho de partículas relaciona uma das propriedades destas a um valor de diâmetro, com resultados distintos, que embora corretos, não permitem comparações indiscriminadas entre elas. Informam ainda que a escolha do método de determinação mais adequado depende de fatores, tais como: a natureza da amostra (dissolvida ou em suspensão, solubilidade das partículas, tamanho das partículas, etc.), a natureza do processo (ou seja, qual é o uso do valor de diâmetro obtido), a resolução de cada técnica (precisão do método) e a tradição da utilização da técnica. A escolha de qual propriedade deve ser analisada está principalmente ligada à utilidade desta informação, ou seja, a escolha da técnica de determinação de tamanho de partícula e do parâmetro descritivo deve, sempre que possível, estar atrelada ao fenômeno que governa o processo ou a operação investigada, conforme supracitado.

As partículas em suspensão encontradas na água são estruturas tridimensionais, em sua maioria irregulares, polidispersas e com diferentes propriedades físico-químicas. É importante quantificar e classificar, para uma determinada amostra de água, a concentração e forma das partículas, concentradas em faixas de tamanho, principalmente para entendimento dos efeitos desta distribuição e da previsão das técnicas de separação sólido/líquido mais adequadas, caso este tipo de procedimento resulte necessário.

Em reservatórios, por exemplo, principalmente no que diz respeito ao transporte de sedimentos, é fundamental, além da determinação da concentração de sólidos (fixos e voláteis), a determinação de sua distribuição granulométrica e suas características morfológicas. Esta análise carrega informações como a natureza e origem do sedimento e pode configurar importante ferramenta de auxílio na tomada de decisões. É consenso que um dos grandes problemas de reservatórios é a redução de sua capacidade em função do transporte de sedimentos das bacias contribuintes. Conhecer, portanto, a distribuição do tamanho de partículas e sua morfologia, torna-se crucial.

Além deste tipo de abordagem a DTP também é parâmetro importante no controle e modelagem dos elementos de drenagem urbana, mapeamento da qualidade da água de rios, entre outros.

Neste sentido, Ahn (2012) realizou estudos de campo para determinação da DTP na enseada de maré Newport Bay, sul da Califórnia, Estados Unidos. As partículas foram agrupadas em três grupos de DTP: partículas em suspensão com tamanho de 10 μ m a 20 μ m (grupo 1), partículas em suspensão similares ao grupo 1, entretanto com predominância das partículas de menor diâmetro (grupo 2) e partículas em torno de 100 μ m (grupo 3). Os três grupos de DTP apresentaram padrões espaciais e sazonais distintos e diferentes relações tamanho/

velocidade de sedimentação, consistentes com a hipótese de que, longitudinalmente, o Newport Bay fraciona as partículas alóctones de seus tributários em função do tamanho e da velocidade de sedimentação e produz partículas autóctones maiores e de rápida sedimentação, provavelmente sob a forma de detritos biológicos. As concentrações de partículas no grupo 1e no grupo 2 são significativamente relacionadas com bactérias indicadoras de contaminação fecal o que sugere uma possível ligação entre a poluição fecal e a transferência de partículas nesta enseada. O autor afirma que as partículas em suspensão desempenham um papel importante na transferência e sequestro de poluentes em águas doces e costeiras, como comprovam os resultados obtidos.

Silva e Silveira (2012) desenvolveram um modelo de pré-dimensionamento de bacias de detenção para o controle da poluição difusa no Município de Porto Alegre, baseado em uma metodologia de maximização de captura de volume e em uma metodologia de cálculo da eficiência da remoção de poluentes. Para a avaliação da eficiência na remoção de sólidos em suspensão em bacias de detenção, os autores utilizaram um método que combina modelos estatísticos de análise de precipitação e escoamento superficial com um modelo de sedimentação para a remoção de sólidos em suspensão sob condições estáticas e dinâmicas. Para utilização deste método é necessário que se conheça a distribuição granulométrica dos sólidos em suspensão contidos na água afluente à bacia de detenção, pois a velocidade de sedimentação depende diretamente do tamanho das partículas em suspensão. Por este motivo, o método permite o cálculo da eficiência da sedimentação por faixas de distribuição granulométrica, podendo ser obtido um valor médio global. A análise da DTP pode fornecer, portanto, informações mais precisas sobre a estrutura das partículas em suspensão.

De acordo com Santos et al. (2004), o aprimoramento de sistemas de tratamento de água e de esgoto tem sido limitado pelo pouco conhecimento dos fenômenos ocorridos no interior das unidades e pela utilização de “parâmetros” não específicos (DBO, DQO etc.) no monitoramento e controle de processos e operações.

Percebe-se que a determinação da DTP pode ser fundamental para o melhor entendimento e equacionamento de diversos processos relacionados à separação sólido/líquido, remoção de poluentes, transporte de sedimentos, entre outros. Neste sentido, este trabalho buscou avaliar um parâmetro representativo da DTP obtido por meio de análise de imagens de suspensão com diferentes valores de DTP, controladas em laboratório por meio da floculação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A água de estudo foi obtida em laboratório a partir de solução de caulinita. A solução de caulinita foi preparada com base no trabalho de Pádua (1994). Foram introduzidos 40 g de caulinita em 1 L de água deionizada e a mistura feita durante duas horas com gradiente médio de velocidade de 1000 s^{-1} . Após mistura, a solução foi deixada em repouso durante 12 horas e o sobrenadante, aproximadamente 800 mL da solução, foi removido para constituir a solução mãe. A turbidez da água

da solução mãe foi de $5000 \pm 200 \text{ uT}$ sendo que para água de estudo eram necessários 10 mL para produção de 2 L de água com turbidez de $25 \pm 2 \text{ uT}$.

Foram conduzidos 5 ensaios utilizando-se a mesma água de estudo, ou seja, foram mantidas fixas todas as características físico-químicas da suspensão. A única diferença entre os ensaios foi a aplicação de diferentes energias de mistura lenta, traduzidas em termos do gradiente médio de velocidade (Gf). Os parâmetros mantidos fixos foram: turbidez da água bruta de 25 uT , pH de coagulação igual a 7,5, gradiente de mistura rápida igual a 1000 s^{-1} , tempo de floculação de 90 minutos e dosagem de coagulante ótima de $2,0 \text{ mgAl/L}$ (obtida preliminarmente).

Para produção das partículas de diferentes tamanhos, importante para condução da análise de DTP foram variados os gradientes de velocidade no processo de formação (floculação). Para tal, foi utilizado equipamento de bancada Jartest para simular o processo de coagulação/floculação, câmera Vision Research Miro EX4 para aquisição de imagens e software Image-Pro Plus para tratamento das imagens e obtenção das características das partículas.

As imagens das partículas foram obtidas nos 10 segundos finais dos tempos de mistura lenta avaliados (90 minutos), a uma taxa de aquisição de 10 Hz, ou seja, foram obtidas e avaliadas 100 fotografias por ensaio. Para elaboração das curvas de DTP foram analisadas, portanto, 4.400 partículas para $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$, 40.268 partículas para $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$, 48.177 partículas para $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$, 53.677 partículas para $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$ e 57.189 partículas para $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$.

A DTP pode ser definida com base no número, massa, diâmetro, área superficial e/ou volume das partículas. Após contagem, as partículas são agrupadas por faixas de tamanho (de algum dos parâmetros) e o número total é conhecido. Segundo Crittenden et al. (2005) a distribuição da frequência do número de partículas $F(d)$ pode ser expressa como a concentração do número de partículas, dN , em relação à fração incremental no tamanho das partículas, $d(dp)$, representada pela Equação (5):

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(d_p)} \quad (5)$$

onde:

$F(dp)$ = função que define a frequência de distribuição de partículas ($d_1, d_2, d_3...$)

dN = concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas ($d(dp)$)

$d(dp)$ = variação incremental dos diâmetros das partículas

Os autores relatam que a frequência de distribuição de partículas aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula e que normalmente segue a equação de distribuição em forma de potência:

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad (6)$$

onde:

A = coeficiente de densidade da equação de potência

(dp) = diâmetro da partícula

β = coeficiente de inclinação da equação de potência

Para determinação dos coeficientes A e β , os quais representam a forma da distribuição dos tamanhos das partículas, pode-se aplicar o Log em ambos os lados da Equação 6 ou realizar a integração da equação.

Após linearização da Equação 6 é obtida a Equação 7:

$$\text{Log} \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] = -\beta \text{Log}(d_p) + \text{Log} A \quad (7)$$

O parâmetro β pode ser extraído diretamente das equações obtidas dos gráficos e constitui o parâmetro multiplicativo de $\text{Log}(dp)$. Para obtenção do parâmetro A , basta utilizar o valor obtido nas equações como expoente de base 10.

Como a Equação 6 descreve também de forma discreta a variação de número de partículas (ΔN) em função da variação do diâmetro da partícula ($\Delta(dp)$) é possível obter-se a forma integral desta equação para valores pré-estabelecidos de faixas de diâmetros (daí um dos motivos de se estabelecer a faixa de tamanho). Assim, a integral da Equação 6, conhecidos os diâmetros médios geométricos de cada faixa da DTP é dada por:

$$N = \frac{A}{-\beta + 1} (d_{i+1}^{-\beta+1} - d_i^{-\beta+1}) \quad (8)$$

onde:

A = coeficiente de densidade da equação de potência

(dp) = diâmetro da partícula

β = coeficiente de inclinação da equação de potência

d_i = diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetros i

d_{i+1} = diâmetro médio geométrico da faixa de diâmetros $i+1$ (faixa de diâmetros imediatamente superior)

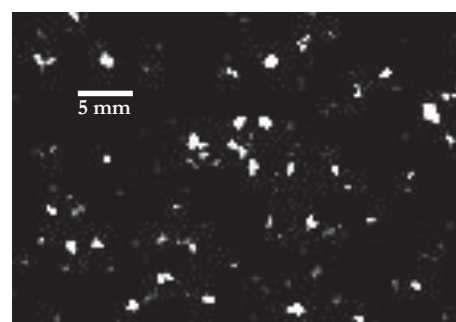
Para esse trabalho foi utilizado faixa de tamanho de 0 a 2 mm, com intervalo discreto de 0,125 mm. Utilizando-se a Equação 8 pode-se aplicar a ferramenta Solver do MS Excel para a regressão não linear. Assim, conhecendo-se o número de partículas medidas por faixa de tamanho, podem ser obtidos os valores do parâmetro β , representativo da DTP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

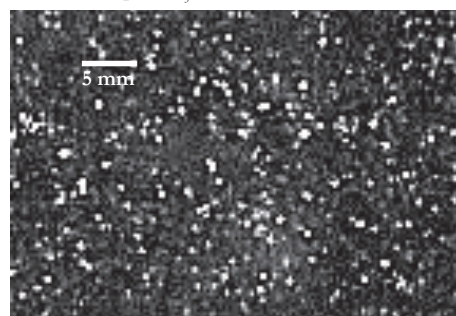
As diferentes distribuições espaciais das partículas analisadas podem ser visualizadas por meio da Figura 1. Argaman (1971) relata que a quebra das partículas devido ao aumento do gradiente de velocidade de floculação (Gf) altera suas características de distribuição, conforme observado na Figura 1 e desejado para este trabalho. A Figura 1 ilustra, portanto, as partículas produzidas com gradientes de velocidade na mistura lenta de 20 s^{-1} (1a), 30 s^{-1} (1b), 40 s^{-1} (1c), 50 s^{-1} (1d) e 60 s^{-1} (1e), nas quais podem ser percebidas as diferentes distribuições de tamanho.

Na Figura 1a são percebidas partículas maiores e em menor número, já nas outras Figuras (1b, 1c, 1d e 1e) são observadas partículas de DTP semelhantes, entretanto, nota-se uma pequena diminuição destas partículas como pode comprovar a Figura 2.

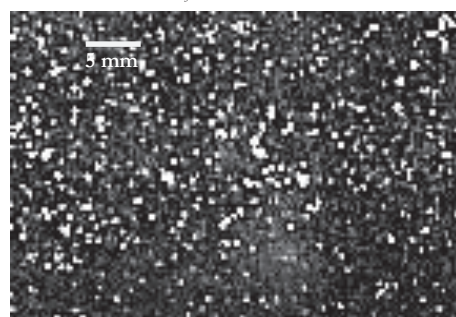
A Figura 2 ilustra a DTP para cada uma das situações descritas na Figura 1 após tratamento das imagens utilizando-se o software Image-Pro Plus.



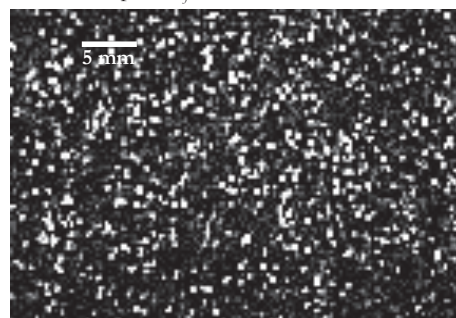
a. Partículas para $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$



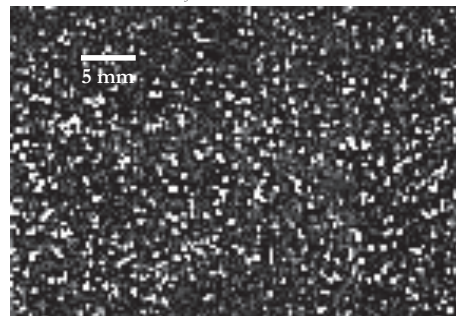
b. Partículas para $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$



c. Partículas para $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$

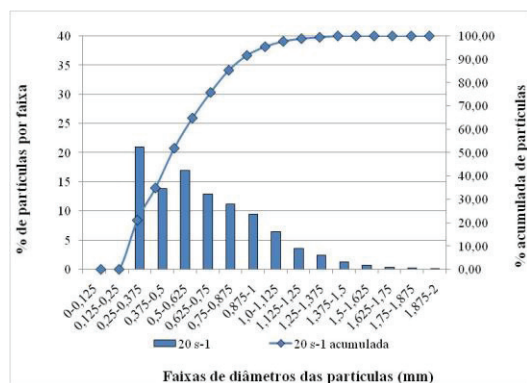
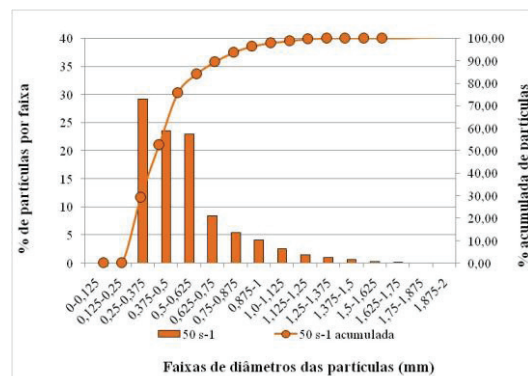
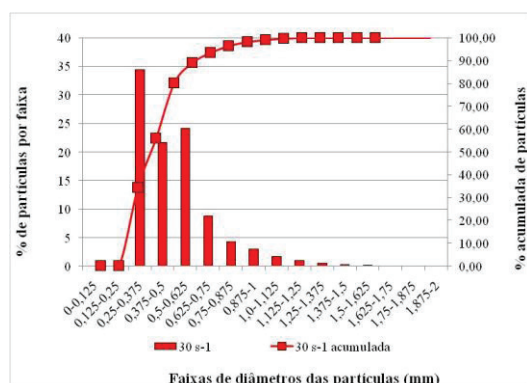
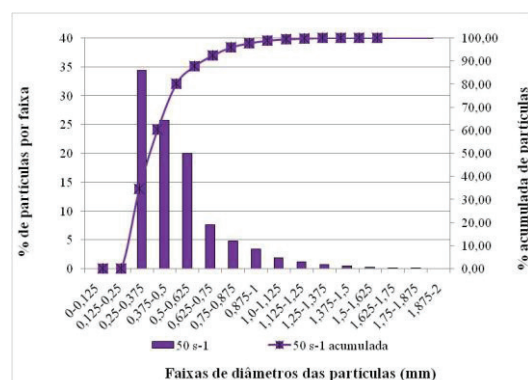
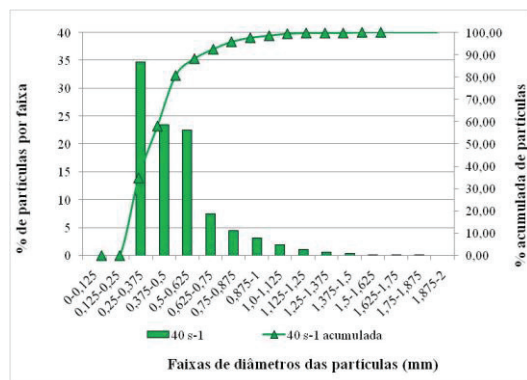
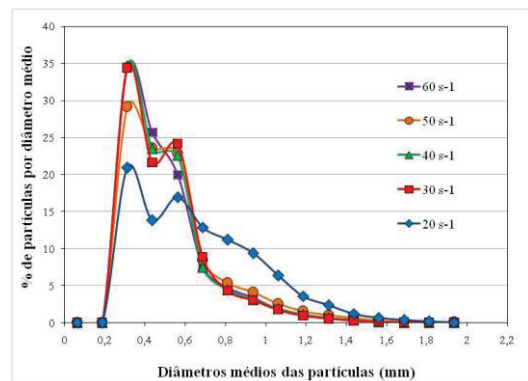


d. Partículas para $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$



e. Partículas para $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$

Figura 1 - Exemplo de fotografias de partículas obtidas sob $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$, $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$, $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$, $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$ e $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$

a. DTP para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ d. DTP para $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ b. DTP para $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ e. DTP para $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ c. DTP para $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ 

f. Família de curvas para todas as DTPs

Figura 2 - Distribuição do tamanho de partículas obtidas sob $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$ e $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$

A Figura 2f ilustra a representação de todas as curvas de DTP. Percebe-se, como foi observado também na Figura 1, que para o gradiente de floculação (G_f) igual a 20 s^{-1} há um deslocamento da curva para a direita traduzindo o predomínio das partículas de maior diâmetro e uma certa estabilidade em torno das partículas de menor diâmetro para os demais gradientes avaliados.

A partir da elaboração dos gráficos mostrados na Figura 2 foi possível a obtenção dos parâmetros representativos da DTP conforme Equações 7 e 8.

Os resultados estão representados nos gráficos da Figura 3. Conforme Crittenden et al. (2005), um valor negativo de β representa o domínio de partículas maiores, um valor de

β igual a 1 representa distribuição homogênea e valor negativo de β representa o domínio das partículas de menor tamanho.

A Tabela 1 mostra o resumo dos valores de β ilustrados nos gráficos da Figura 3. Conforme esta figura e a Tabela 1 verifica-se um valor de β bem inferior para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ do que para os demais gradientes. De fato, percebe-se pela Figura 1 certa semelhança entre as partículas obtidas para os demais gradientes, o que também é verificado pelo parâmetro representativo β . Esta constatação permite inferir que este parâmetro pode ser utilizado como definidor da DTP de determinada amostra de água, entretanto, como será explicado posteriormente, há a necessidade de se padronizar as faixas de diâmetros avaliadas.

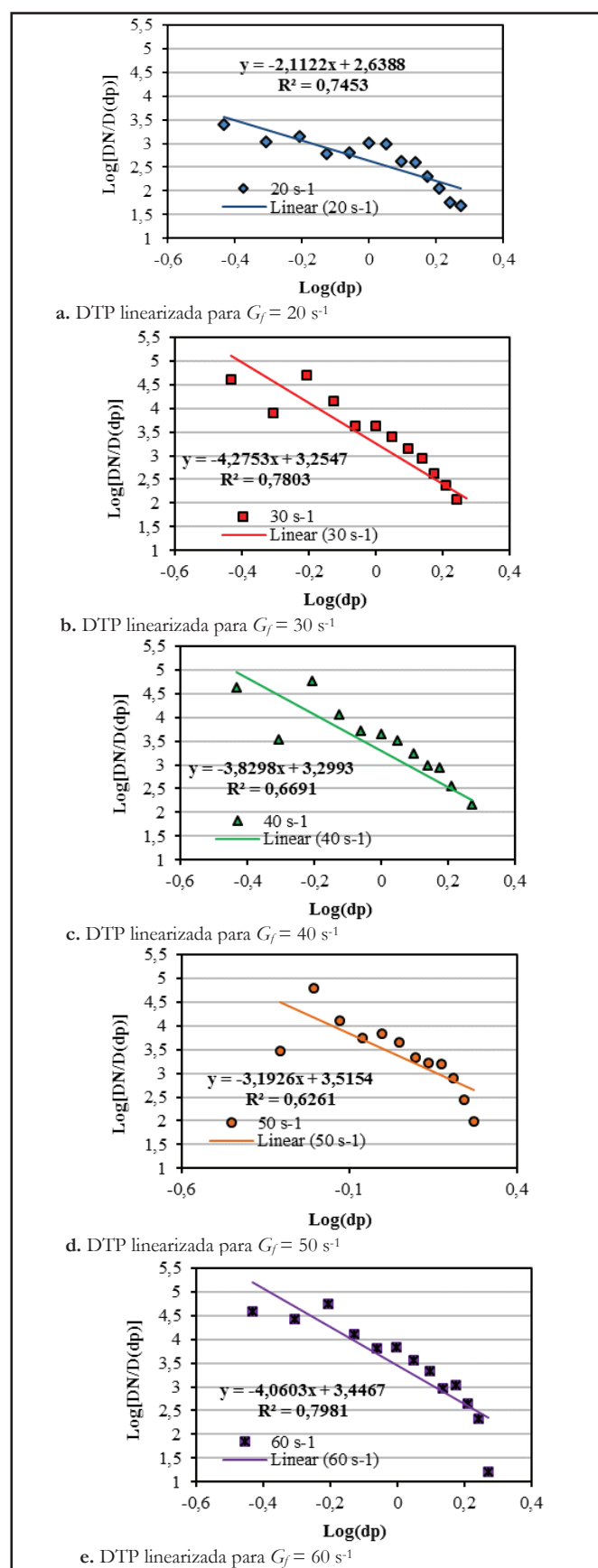


Figura 3 - Dados linearizados das DTPs conforme Equação 7 sob $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 50 \text{ s}^{-1}$, e $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ para obtenção do coeficiente β da Equação 6, representativo da DTP

Tabela 1 – Valores de β obtidos nos ensaios de floculação para diferentes gradientes de velocidade obtidos por meio da linearização da Equação 10

Gradiente médio de velocidade (s^{-1})	β
20	2,11
30	4,28
40	3,83
50	3,20
60	4,06

Considerando-se a forma integral da Equação 6 (Equação 8) e aplicando-se a ferramenta Solver do MS Excel para a regressão não linear, foi possível conhecer o número de partículas medidas por faixa de tamanho e à partir destes resultados foram obtidos os valores do parâmetro β , representativo da DTP, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de β obtidos a partir da integral da Equação 6 (Equação 8)

Gradiente médio de velocidade (s^{-1})	β
20	0,99
30	1,57
40	1,59
50	1,41
60	1,59

Comparando os valores obtidos nos diferentes métodos observa-se uma diferença na magnitude do parâmetro calculado, reflexo da equação de origem. Entretanto a relação entre os parâmetros obtidos por meio dos diferentes métodos obedece ao comportamento linear, com coeficiente de explicação (R^2) de 0,93. A proporção entre os parâmetros obtidos pelas duas equações é da ordem de 1: 3,28, como pode ser verificado na Figura 5.

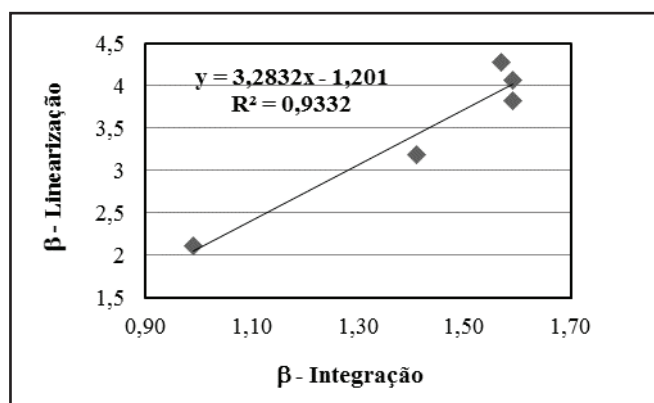


Figura 5 – Relação entre os diversos valores de β obtidos por meio da Equação 8 e da Equação 9

A relação observada significa que ambos os métodos de cálculo do parâmetro β conduzem a resultados que expressam de forma semelhante as alterações da DTP em função da situação

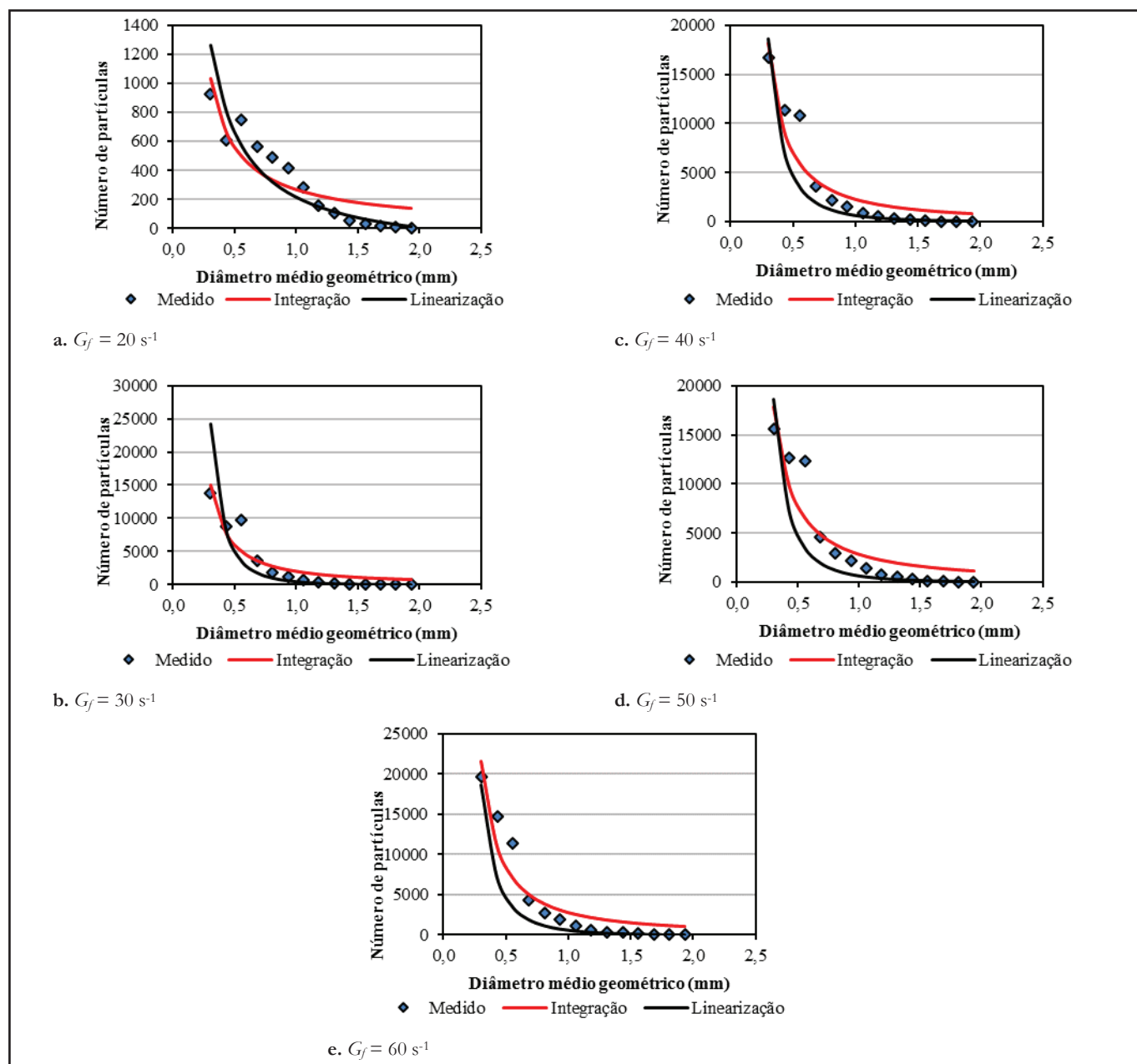


Figura 6 - DTP obtida por faixa de diâmetros em laboratório e a partir de β calculado por linearização e integração da Equação 6.

existente na amostra de água. Percebe-se, portanto, o mesmo comportamento relativo para os valores de β independente do método de obtenção. Vale mencionar que o parâmetro β representa a quantidade relativa de partículas em cada faixa de tamanho, sendo assim, tal parâmetro assume valores distintos a depender da equação de origem de modo que a quantidade relativa em cada faixa possa ser representada.

Para traduzir em número de partículas (DTP) o valor de β obtido, é necessário o conhecimento das faixas de tamanho originárias dos resultados. A Figura 6 ilustra a DTP obtida em laboratório por faixa de diâmetros e os valores obtidos a partir do parâmetro β determinado por meio de linearização e integração da Equação 6 (Equações 7 e 8, respectivamente).

A análise dos resultados permite concluir que a reprodução da concentração de partículas por faixa de tamanho

utilizando-se o parâmetro β conduz a resultados representativos, ou seja, coerentes com os valores medidos. Pode-se observar que dependendo da distribuição de partículas avaliada (partículas obtidas a diferentes gradientes de velocidade), os caminhos distintos para obtenção do β conduzem a representações variáveis, ou seja, não é possível definir, considerando-se todas as situações, qual alternativa é mais viável.

A Tabela 3 ilustra os erros absolutos e relativos ao se realizar a conversão do parâmetro representativo da DTP, β , em número de partículas por faixa de tamanho. O intervalo de diâmetros é em mm.

Os dados mostrados na Tabela 3 traduzem o comportamento das curvas apresentadas nos gráficos da Figura 6. Podem ser observados erros relativos elevados, entretanto, o erro global é razoável, principalmente considerando-se os nú-

Tabela 3 – Erros das DTPs obtidas por meio do parâmetro representativo β

INTERVALO (dmín - dmáx)	N. DE PARTÍCULAS - 20 s ⁻¹			ERRO %	
	MED	INT	LIN	INT	LIN
0,125-0,25	0	0	0	0	0
0,25-0,375	922	1008	1262	9	27
0,375-0,5	609	637	810	4	25
0,5-0,625	745	469	569	-59	-31
0,625-0,75	567	373	420	-52	-35
0,75-0,875	492	309	319	-59	-54
0,875-1	413	265	246	-56	-68
1,0-1,125	281	231	191	-22	-47
1,125-1,25	158	205	148	23	-6
1,25-1,375	105	185	114	43	8
1,375-1,5	54	168	87	68	38
1,5-1,625	29	154	63	81	54
1,625-1,75	15	142	44	89	66
1,75-1,875	8	132	27	94	70
1,875-2	2	123	13	98	84
2-2,125	0	0	0	0	0
Total =>	4400	4400	4312	19	9

INTERVALO (dmín - dmáx)	N. DE PARTÍCULAS - 30 s ⁻¹			ERRO %	
	MED	INT	LIN	INT	LIN
0,125-0,25	0	0	0	0	0
0,25-0,375	13848	14534	24140	5	43
0,375-0,5	8707	7088	8071	-23	-8
0,5-0,625	9715	4398	3532	-121	-175
0,625-0,75	3558	3063	1811	-16	-96
0,75-0,875	1744	2287	1028	24	-70
0,875-1	1221	1789	625	32	-95
1,0-1,125	696	1447	398	52	-75
1,125-1,25	387	1201	261	68	-48
1,25-1,375	210	1017	174	79	-21
1,375-1,5	103	875	116	88	11
1,5-1,625	50	763	76	93	34
1,625-1,75	20	672	48	97	58
1,75-1,875	5	598	27	99	81
1,875-2	4	537	12	99	66
2-2,125	0	0	0	0	0
Total =>	40268	40268	40318	41	-21

INTERVALO (dmín - dmáx)	N. DE PARTÍCULAS - 40 s ⁻¹			ERRO %	
	MED	INT	LIN	INT	LIN
0,125-0,25	0	0	0	0	0
0,25-0,375	16718	17644	18589	5	10
0,375-0,5	11301	8520	7160	-33	-58
0,5-0,625	10859	5251	3479	-107	-212
0,625-0,75	3601	3639	1935	1	-86
0,75-0,875	2155	2706	1173	20	-84
0,875-1	1485	2109	753	30	-97
1,0-1,125	927	1701	501	46	-85
1,125-1,25	522	1408	342	63	-53
1,25-1,375	300	1190	235	75	-28
1,375-1,5	178	1021	161	83	-10
1,5-1,625	71	889	108	92	34
1,625-1,75	26	782	69	97	62
1,75-1,875	26	695	40	96	35
1,875-2	8	622	18	99	54
2-2,125	0	0	0	0	0
Total =>	48177	48177	34564	40	-37

INTERVALO (dmín - dmáx)	N. DE PARTÍCULAS - 50 s ⁻¹			ERRO %	
	MED	INT	LIN	INT	LIN
0,125-0,25	0	0	0	0	0
0,25-0,375	15631	17251	18808	9	17
0,375-0,5	12650	9066	8839	-40	-43
0,5-0,625	12284	5912	4967	-108	-147
0,625-0,75	4559	4276	3091	-7	-48
0,75-0,875	2907	3291	2049	12	-42
0,875-1	2226	2642	1415	16	-57
1,0-1,125	1385	2185	1002	37	-38
1,125-1,25	824	1849	719	55	-15
1,25-1,375	560	1593	518	65	-8
1,375-1,5	358	1392	369	74	3
1,5-1,625	160	1231	256	87	38
1,625-1,75	63	1100	169	94	63
1,75-1,875	29	991	100	97	71
1,875-2	41	899	45	95	9
2-2,125	0	0	0	0	0
Total =>	53677	53677	42348	35	-14

INTERVALO (dmín - dmáx)	N. DE PARTÍCULAS - 60 s ⁻¹			ERRO %	
	MED	INT	LIN	INT	LIN
0,125-0,25	0	0	0	0	0
0,25-0,375	19645	20948	31443	6	38
0,375-0,5	14674	10114	11257	-45	-30
0,5-0,625	11391	6233	5183	-83	-120
0,625-0,75	4323	4319	2765	0	-56
0,75-0,875	2737	3211	1620	15	-69
0,875-1	1940	2503	1011	23	-92
1,0-1,125	1074	2019	658	47	-63
1,125-1,25	622	1671	440	63	-41
1,25-1,375	355	1412	298	75	-19
1,375-1,5	237	1212	201	80	-18
1,5-1,625	103	1055	133	90	23
1,625-1,75	48	928	84	95	43
1,75-1,875	21	824	48	97	57
1,875-2	19	738	21	97	10
2-2,125	0	0	0	0	0
Total =>	57189	57189	55164	40	-24

meros de partículas por faixas, obtidos a partir do parâmetro β da equação linearizada. Os erros globais são bons indicadores do comportamento geral do modelo permitindo verificar se houve subestimação ou superestimação dos valores calculados.

Vale ser mencionado também que, pela própria natureza das funções de distribuição de tamanho, o ajuste será tão

maior quanto mais próximo do comportamento decrescente encontram-se os dados experimentais, com pico na primeira faixa. Assim, perturbações pontuais nas faixas intermediárias conduzem ao aumento dos erros relativos. Existem, portanto, limitações quanto à utilização do método, entretanto, em algumas situações específicas pode ser utilizado com êxito. Em trabalhos que envolvem modelagem, por exemplo, nos quais há necessidade do desenvolvimento de funções contínuas, o método proposto pode ser utilizado, desde que a análise seja realizada à luz de suas limitações. A aplicação de modelos com três parâmetros podem ser uma alternativa para aprimorar o ajuste matemático em distribuições não monotônicas, tal como apresentado por Lawler (1997) e Fadal, Haarhoff e Marais (2012).

Para maior confiabilidade do método recomendam-se estudos piloto para análise da distribuição de tamanho de material particulado a fim de se verificar qual técnica conferirá menor erro.

CONCLUSÃO

A representação da Distribuição do Tamanho de Partículas por meio de seu parâmetro β se mostrou de fácil reprodutibilidade. Esta verificação é extremamente relevante considerando que a análise comparativa de DTP de diversas coleções hídricas se torna rápida por meio da avaliação de um único parâmetro representativo ao invés

de um pacote de valores. A possibilidade da utilização desse único parâmetro para obtenção de frequências de partículas por faixa de tamanho deve ser considerada como o principal objetivo desta representação.

Entretanto, dada a própria natureza das funções de distribuição de tamanho estudadas nesse trabalho, o modelo matemático é mais bem ajustado quando os dados experimentais apresentam comportamento monotônico. A aplicação de modelos com três parâmetros podem ser uma alternativa para aprimorar o ajuste matemático em distribuições modais, cujos valores máximos são dispostos em classes de tamanho intermediárias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pelo apoio financeiro (processos FAPESP 2010/50694-0, 2013/21355-1, 2013/01634-3 e 2013/25641-9), ITA e UNESP-IGCE-Campus de Rio Claro, pela infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- AHN, J. H. Size distribution and settling velocities of suspended particles in a tidal embayment. *Water Research*, v. 46, p. 3219-3228, jun. 2012.
- ARGAMAN, Y. Pilot-Plant Studies of flocculation. *Journal AWWA*, v. 63, n. 12, p. 775-777, 1971.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- CANHOLI, A. P. Projetos Hidráulicos. In: *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de textos, 2005, p.145-174.
- CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. *Water Treatment: Principles and Design*. 2nd ed., 2005.
- FADAL, M. F.; HAARHOFF, J.; MARAIS, S. A new model for the simplification of particle counting data. *Drink. Water Eng. Sci. Discuss.*, v. 5, p. 9-14, jun. 2012.
- JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. *Bioprocess Biosyst Eng*,

v. 29, p. 185-206, July 2006.

LAWLER, D. F. Particle size distribution in treatment process: theory and practice. *Water Science and Technology*, v. 36, n. 4, p. 15-23, 1997.

PÁDUA, V. L. *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos*. 1994. 165 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

URBONAS, B.; STAHERE, D. *Stormwater. Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 291-300, out/dez 2004.

SILVA, M. K.; SILVEIRA, A. L. L. Modelo para Pré-Dimensionamento de Bacias de Detenção para Controle da Poluição Difusa das Águas Pluviais no Município de Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17 n. 2, p. 121-130, abr/jun 2012.

Contribuição dos autores:

André Luiz de Oliveira. Proposição dos testes, realização dos testes, análise dos resultados e produção do artigo

Pamela Moreno. Realização dos testes, análise dos resultados e produção do artigo

Ricardo Henrique de Andrade Dutra. Análise dos resultados, auxílio no atendimento às solicitações dos revisores e produção da versão final do artigo

Marcelo De Julio. Concepção inicial da pesquisa; desenvolvimento do modelo, proposição dos testes, produção do artigo

Rodrigo Braga Moruzzi. Concepção inicial da pesquisa; desenvolvimento do modelo, proposição dos testes, realização dos testes, análise dos resultados e produção do artigo.