

I-021 - AVALIAÇÃO DE DIÂMETROS EQUIVALENTES PARA OBTENÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS NA FLOCULAÇÃO

Lívia Savioli Manetta ⁽¹⁾

Engenheira Química pela Faculdade Pitágoras (2011). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela UNESP (2014). Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental pela UNESP.

Rodrigo Braga Moruzzi

Professor Adjunto – III Unesp, Campus de Rio Claro. Dr/MSc./Bacharel Eng. Civil.

Endereço⁽¹⁾: Avenida 24A, 1515., Rio Claro – SP, CEP: 13506-900 – Brasil –Tel: +55 (15) 3526-9339 – e-mail: livia.savioli@yahoo.com.br

RESUMO

Este texto apresenta estudo comparativo, entre alguns diâmetros equivalentes, aplicado na determinação distribuição de tamanho de partículas floculentas. Para tal foi realizado ensaio de bancada usando *gartest* acoplado a um sistema de aquisição e tratamento de imagem. Foram investigadas as projeções de esferas equivalentes em área, perímetro, média aritmética (diâmetro médio) e geométrica (para medidas de mínima e máxima). Os resultados foram avaliados conforme o conceito de diâmetro equivalente resultando uma forma esférica e demonstram que para cada diâmetro equivalente obtido por diferentes métodos, obtêm-se diferentes distribuições de tamanho de partículas e diferentes diâmetros médios, evidenciando sua sensibilidade conforme o método empregado e conforme formato da partícula estudada.

PALAVRA-CHAVE: Diâmetro Equivalente, Floculação, Distribuição de Tamanho de Partícula.

INTRODUÇÃO

As partículas em suspensão encontradas na água são estruturas tridimensionais, polidispersas e de geometria irregular, sendo necessário estabelecer um referencial; sua quantificação e classificação, respectivamente em concentração e forma são importantes principalmente para o entendimento dos efeitos desta distribuição e para a previsão das técnicas de separação mais adequadas (Oliveira *et al.*, 2015).

A agregação de pequenas partículas em partículas maiores é um método bem estabelecido de remoção de turbidez, cor e outros materiais orgânicos e inorgânicos em obras de tratamento de água (Jarvis, 2005). As etapas de coagulação / floculação em uma estação de tratamento de água são de vital importância, pois são responsáveis pela desestabilização e formação dos agregados que serão separados através do processo de interação físico-químico e formação de flocos cujas características físicas de formato dependem de características intrínsecas de processo e das substâncias envolvidas, delimitando o sucesso nas etapas subsequentes do tratamento.

Quanto à geometria dos agregados, Junker (2006) explicita que o diâmetro de uma partícula pode ser obtido por meio de medições diretas, como por exemplo, área e diâmetro máximo e mínimo, ou por meio de cálculo de diâmetro equivalente, assumindo a forma esférica como representativa, visto que essa é a única que pode ser representada por um único número. Entre as expressões existentes para retratar o diâmetro equivalente esférico pode-se citar o geométrico e o aritmético. Segundo Santos *et al.* (2004) dentre as técnicas de determinação de tamanho de partículas existem as sem fracionamento da amostra, na qual não é aplicado nenhum mecanismo de separação, conseqüentemente as frações de tamanho presentes na amostra são determinadas por uma única medição e quando a análise do tamanho da partícula é processada a partir de técnicas de imagem, pode-se utilizar o comprimento máximo, a área projetada ou perímetro como referências de equivalência ao diâmetro.

Neste texto serão abordadas diferentes equações para obtenção de diâmetro equivalente utilizando-se dados gerados por técnica de análise de imagem.

OBJETIVO

Avaliar a resposta da distribuição de tamanho de partícula para diferentes diâmetros equivalentes.

METODOLOGIA

Para a execução deste trabalho foram realizados ensaios em equipamento de bancada *jartest* do processo de coagulação e floculação com água preparada a partir de solução padrão de caulinita. A solução padrão foi produzida em laboratório conforme descrita em Pádua (1994) na proporção de 40g de caulinita para cada 1L de água deionizada. O gradiente de mistura rápida utilizado na etapa de coagulação foi de 1.000 s^{-1} , durante tempo de 20 s, em pH de coagulação de 7,4 e turbidez inicial de 25 NTU. Para promover a etapa de coagulação foi utilizado como coagulante o sulfato de alumínio com dosagem de $2,0\text{ mg Al}^{+3}/\text{L}$, conforme Oliveira *et al.* (2015). O tempo de floculação foi mantido fixo em 20 minutos e os gradientes médios de velocidade de floculação (G_f) foram especificados em 30 s^{-1} , 40 s^{-1} , 50 s^{-1} , 75 s^{-1} , 100 s^{-1} e 150 s^{-1} .

O princípio da esfera equivalente foi adotado para referência de tamanho, tal como descrito em Santos *et al.* (2004). Para a obtenção dos valores correspondentes aos diâmetros equivalentes investigados, foram medidos atributos dos agregados por meio da aplicação de método não intrusivo de análise de imagem com a utilização da câmara *High-Speed Vision Research Miro EX4*, adaptado de Moruzzi e Reali (2007). O plano de aquisição das imagens foi definido a partir de um plano de luz produzido por um laser de 2.000 mW com comprimento de onda de 532 nm , conforme Figura 1. Para cada valor de G_f , foram adquiridas 100 imagens nos 10 segundos finais do tempo de floculação de 20 minutos. Os atributos dos agregados foram determinados por meio das ferramentas do *Software Image Pro-Plus 7.0®*.

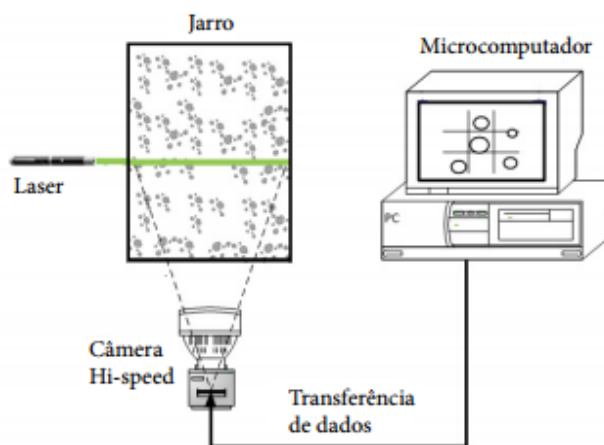


Figura 1 - Esquema ilustrativo do aparato experimental para aquisição de imagens digitais capturadas durante os ensaios de floculação em escala de bancada. Extraído de Moruzzi *et al.* (2016).

Neste artigo, os diâmetros equivalentes foram calculados com base nos atributos dados pela área projetada no plano, perímetro da elipse circunscrita e do comprimento (máximo, mínimo e média). Assim, foram calculados os diâmetros das esferas equivalentes pela área e pelo perímetro da elipse. Os diâmetros estatísticos obtidos a partir das medidas de comprimento (máximo, mínimo e médio) foram determinados por meio da média geométrica e aritmética.

O diâmetro equivalente médio em área foi obtido pela Equação 1. Onde: d_A é o diâmetro médio equivalente da área, A_i é o valor de área projetada no plano da imagem capturada e n é o número total de partículas estudadas (por faixa ou total) em um determinado G_f .

$$d_A = \left(\sum \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \right) / n$$

Equação 1

O diâmetro médio do perímetro da elipse foi obtido pela Equação 2. Neste, o diâmetro equivale ao de uma esfera com mesmo valor correspondente ao perímetro da elipse circunscrita ao agregado. Onde: d_p representa o diâmetro médio equivalente da elipse e P_i é o perímetro da elipse.

$$d_p = \left(\sum \frac{P_i}{\pi} \right) / n$$

Equação 2

O diâmetro médio aritmético (d_a) foi determinado conforme Equação 3. Este diâmetro equivalente utiliza o atributo dado pelo comprimento médio (d_i) do agregado, sendo que o comprimento por agregado é definido pela média das medidas de 2 em 2 graus a partir do centro geométrico da partícula. .

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

Equação 3

O diâmetro médio geométrico (d_g) foi obtido pela Equação 4. Foram utilizados os valores de diâmetro máximo ($d_{MÁX}$) e diâmetro mínimo ($d_{MÍN}$) de todas as partículas classificadas em faixas de interesse.

$$d_g = \left(\sum \sqrt{d_{MÁX} * d_{MÍN}} \right) / n$$

Equação 4

Após a determinação dos diâmetros equivalentes para cada partícula, estas foram agrupadas por faixas de tamanhos visando avaliar a frequência em cada faixa, por meio da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP). As faixas de diâmetro equivalente utilizadas nesse estudo foram de 0 mm a 6,75 mm com incrementos de 0,25 mm.

Em seguida, foi contabilizado o número de partículas por faixa de DTP (n_i) e definido a frequência do diâmetro por faixa (f_i), como sendo a quantidade de partículas presente na faixa de DTP dividido pelo total de partículas encontradas na mesma faixa (n_t), apresentada na Equação 5. Posteriormente, foi calculado o diâmetro ponderado (DP) de cada faixa de DTP expresso pela Equação 6, que conjectura a concentração de partículas do diâmetro representativo da faixa (d_i) multiplicada pela frequência correspondente f_i .

$$f_i = \frac{n_i}{n_t}$$

Equação 5

$$DP = \sum_{i=1}^n f_i d_i$$

Equação 6

Conforme descrito em Crittender *et al.* (2005), a distribuição de tamanho de partículas pode ser representada na forma de potência, conforme Equação 7. Nessa equação, o primeiro termo a esquerda representa a concentração incremental do número de partículas (dN) em relação à variação incremental no diâmetro de partícula $d(dp)$. No termo da direita, β representa o coeficiente de inclinação da equação de potencia e A o coeficiente de densidade. Para a obtenção dos valores dos parâmetros β e A , para cada G_f e em cada diâmetro equivalente, foi utilizada a Equação 8 resultante da linearização da Equação 7.

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta}$$

Equação 7

$$\log \left[\frac{dN}{d(d_p)} \right] = \log(A) - \beta \log(d_p)$$

Equação 8

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas condições investigadas o tamanho do pixel da imagem foi de 15µm. Foram analisadas 3.817 partículas para $G_f=30 \text{ s}^{-1}$, 17.307 partículas para $G_f=40 \text{ s}^{-1}$, 26.728 partículas para $G_f=50 \text{ s}^{-1}$, 33.076 partículas para $G_f=75 \text{ s}^{-1}$, 52.929 partículas para $G_f=100 \text{ s}^{-1}$ e 45.407 partículas para $G_f=150 \text{ s}^{-1}$. O número total de flocos obtidos, em análise de imagem para cada G_f , aumenta a medida que o G_f aumenta, isso ocorre devido ao maior choque entre os flocos provocado pelo valor de G_f adotado. Percebe-se que o número total de flocos para o G_f

de 150s^{-1} é menor se comparado com o número obtido para o G_f de 100s^{-1} , esta ocorrência se deve ao aumento de partículas nas menores faixas de DTP e à resolução do pixel na qual foi realizado este estudo.

Na Figura 2 está representada, a título de exemplo, uma das imagens obtidas para os G_f de 40 s^{-1} e 100 s^{-1} . Observa-se que o tamanho das partículas é maior na Figura 2a com G_f de 40 s^{-1} do que na Figura 2b em que o G_f é de 100 s^{-1} . Quanto maior o gradiente, menor foi o tamanho médio das partículas encontradas. Esta afirmação pode ser confirmada ao analisar a Figura 4, no qual pode-se visualizar uma concentração maior de partículas nas menores faixas de tamanhos com o aumento do G_f .

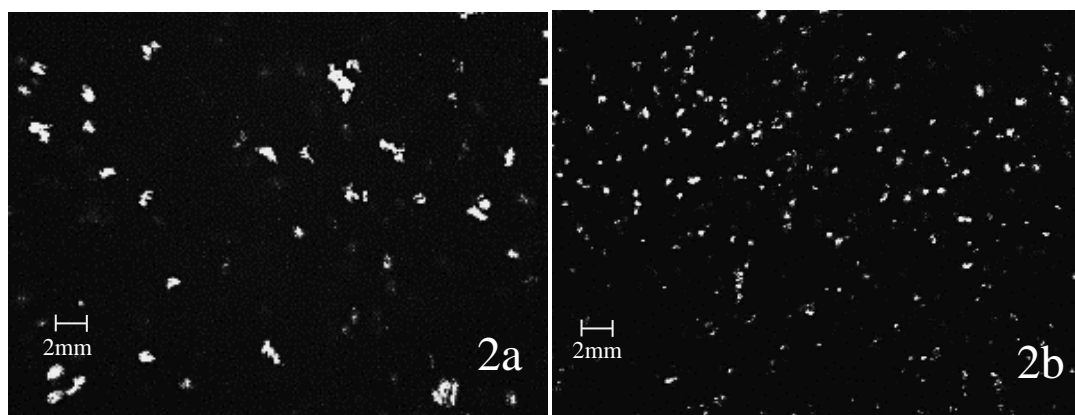


Figura 2 — Exemplo de imagens obtidas para os G_f de 40 s^{-1} (Figura 2a) e G_f de 100 s^{-1} (Figura 2b).

Para a análise dos diâmetros equivalentes estudados, procedeu-se de duas formas. Em um primeiro momento foi feita a análise do universo de dados obtidos sem fazer distinção de faixas de tamanho e posteriormente foi feita por classificação em faixas de tamanho de partículas, no qual partículas de mesmo diâmetro equivalente foram agrupadas em faixas.

Para a análise do universo de dados obtidos sem distinção de faixas de tamanho, expostos através do gráfico da Figura 3, os dados obtidos explicitam os diferentes valores de diâmetro equivalente médio, encontrados para um mesmo G_f e mesmo tempo de floculação. Na Figura 3 são apresentados os diâmetros equivalentes em área, perímetro, aritmético e geométrico. Os mesmos valores podem ser obtidos ao somar os dados de diâmetros ponderados de todas as faixas de tamanho de partículas para um mesmo G_f e mesmo diâmetro equivalente. Observa-se que para cada método empregado resultou em um valor diferente de diâmetro, para o mesmo G_f . Sendo que, analisando o conjunto de dados, o diâmetro equivalente de perímetro corresponde aos maiores valores médios encontrados para todos os G_f e o geométrico com os menores valores médios de diâmetro equivalente.

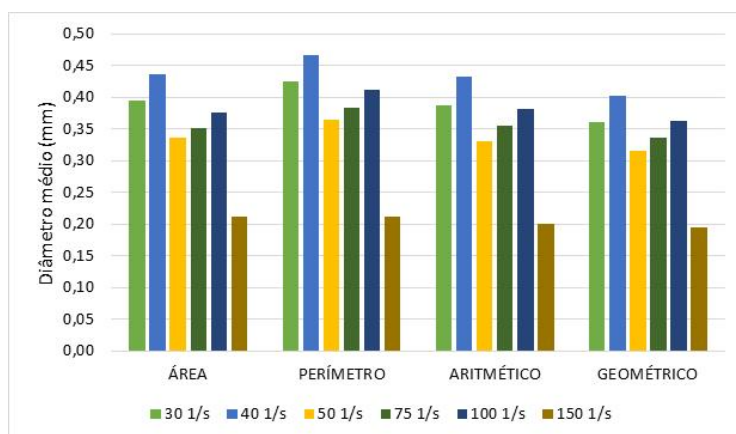


Figura 3 – média de diâmetros equivalentes encontrados para cada G_f estudado.

A Figura 4 representa a distribuição do diâmetro ponderado (DP) para cada diâmetro equivalente em diferentes faixas de tamanho e para cada G_f estudado. O diâmetro ponderado médio encontrado para cada faixa de DTP evidencia a influência da frequência de partículas encontradas. Observa-se também uma diferença nos diâmetros equivalentes encontrados para a mesma faixa de tamanho analisada. Quanto menor o tamanho da partícula, maior o valor encontrado do diâmetro ponderado, pois a frequência (f) de flocos nas menores faixas de tamanho é maior. Conforme o valor de G_f empregado aumenta, a parcela de resultados nas maiores faixas de tamanho de partículas diminui, ou deixa de existir, pois quanto maior o valor de G_f maior a tensão que resulta na ruptura dos flocos.

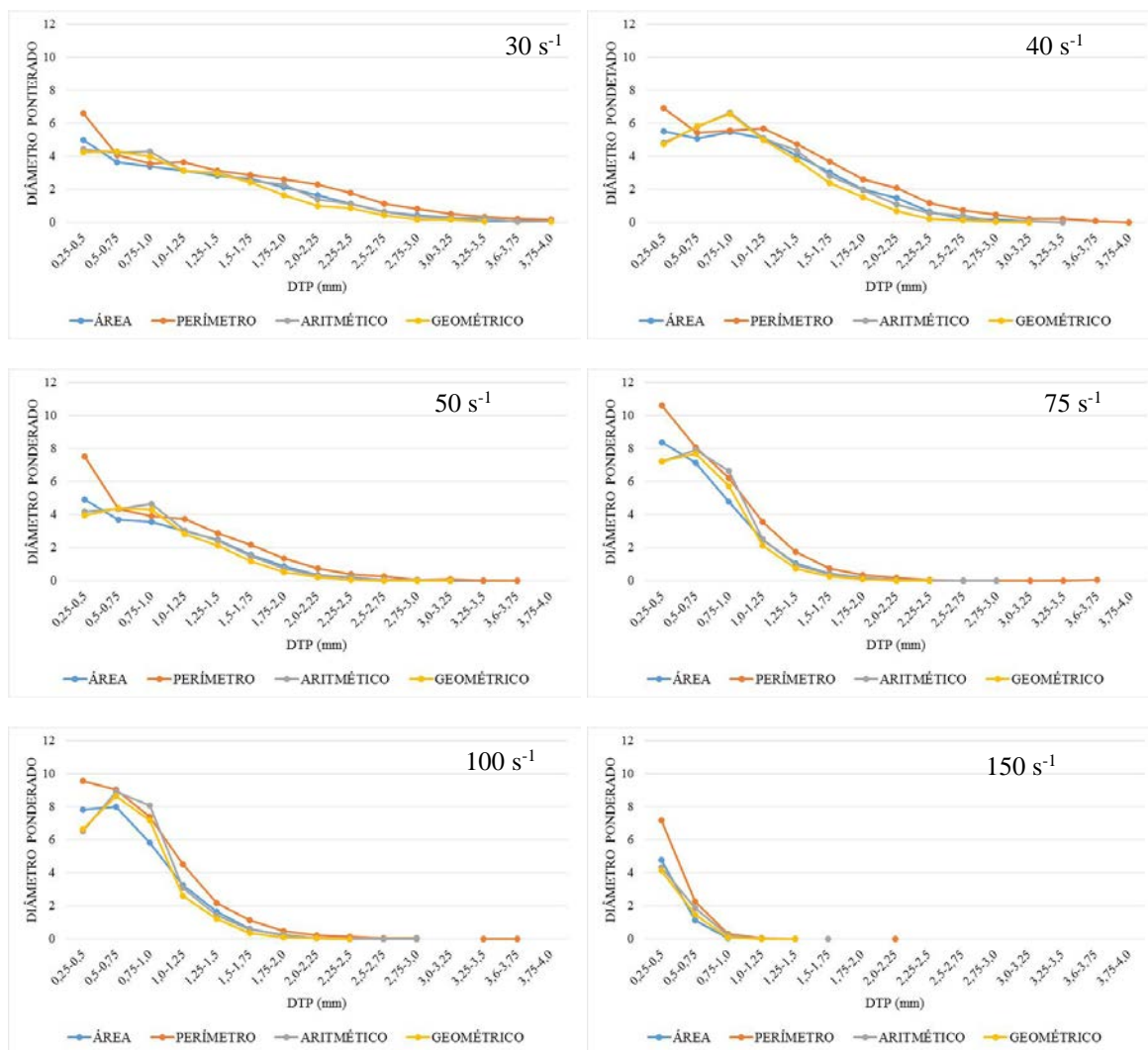


Figura 4 – DTP obtido dos diâmetros ponderados para todos os G_f estudados

Os diâmetros estatísticos, geométrico e aritmético, resultaram em valores muito próximos, sendo que o diâmetro equivalente geométrico é o que deriva em resultados mais próximos ao limite inferior do tamanho da partícula gerado nos dados brutos, esta tendência pode ser observada na Figura 4 no qual a linha que representa o diâmetro geométrico é o que resulta na maioria dos casos, nos menores valores de diâmetro ponderado e na Figura 3 que apresenta a menor média de diâmetro encontrado para todos os G_f . Observar-se ainda, na Figura 4, que em geral, menores agregados resultaram em maiores diferenças entre diâmetros equivalentes. Esta ocorrência pode estar relacionada a resolução das imagens geradas e ao tamanho das menores partículas. Foi estudado em Moruzzi e Reali (2010) o erro referente ao tratamento de imagem, considerando este como uma razão teórica entre a área do pixel da imagem e da partícula estudada, resultando em erros menores que 1% quando o tamanho da partícula é 10 vezes maior do que o tamanho do pixel; foi também discutido em Chakraborti et al (2003) a influência do tamanho relativo do pixel obtido em relação ao tamanho da partícula, em que a área de uma partícula pertencente a menores DTPs pode ser superestimada.

Os resultados de diâmetros ponderados para o diâmetro equivalente em área acompanham de certa forma, em comportamento os resultados encontrados para os diâmetros equivalentes em perímetro da elipse, sendo que os diâmetros considerando o perímetro da elipse apresentaram maiores valores como resposta a aplicação do respectivo método. A forma da partícula analisada tem grande influência nos resultados encontrados visto que partículas perfeitamente esféricas tem a razão entre a área e o perímetro de um quarto do diâmetro e para partículas alongadas esta razão é menor do que a anterior. Assim, o diâmetro equivalente em área para partículas alongadas será sempre menor do que o diâmetro equivalente em perímetro, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 4.

A partir da Distribuição de Tamanho de Partículas demonstrado na Figura 4 foi obtida a equação de distribuição em forma de potencia das Equações 6 e 7, apresentado na Figura 5 com equação da regressão linear que representa os valores dos parâmetros β , A e valor de R-quadrado para o G_f de $50s^{-1}$ em todos os diâmetros equivalentes. O valor acompanhado da incógnita x é o valor de β e o valor somado a este é o valor de $\log(A)$. O valor literal gerado no gráfico deve ser aplicado na Equação 8 para obtenção do valor dos parâmetros β e A , adotando como exemplo a equação gerada no gráfico da Figura 5 para o diâmetro ponderado de área que resulta em $y = -3,53x + 3,16$ aplicada à Equação 8 será expressa em $\log[dN/d(d_p)] = 3,16 - (-3,53)\log(d_p)$, então, $-\beta = -3,53 \therefore \beta = 3,53$ e $\log(A) = 3,16 \therefore A = 1,44$.

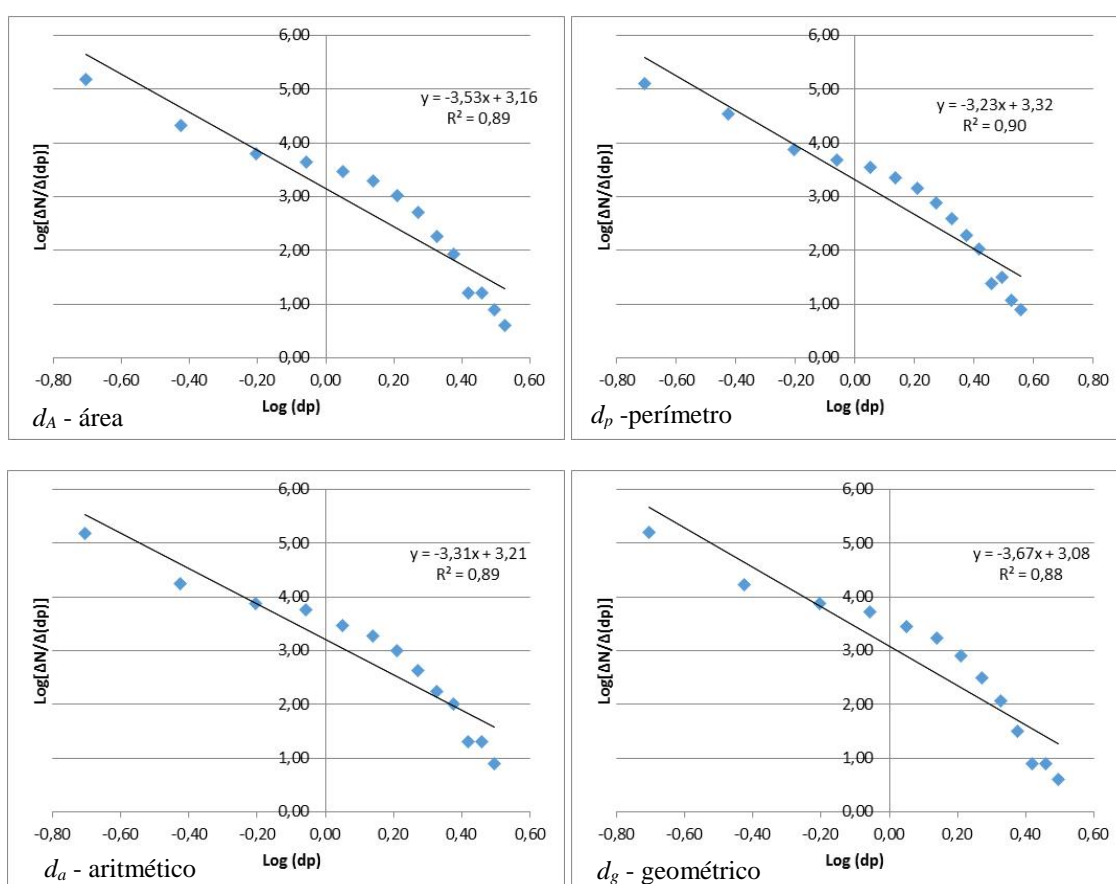


Figura 5 – DTP linearizado com equação de regressão linear e valor de R-quadrado para o G_f de $50s^{-1}$

Os dados obtidos e expostos através do gráfico da Figura 6 explicitam valor de β calculado para os diferentes valores de diâmetro equivalente médio encontrado para um mesmo G_f e mesmo tempo de floculação. Observa-se que os valores de β encontrados, resultantes da equação de lei de potencia aplicada, são inversamente proporcionais aos valores de diâmetros equivalentes conforme pressupõe equação.

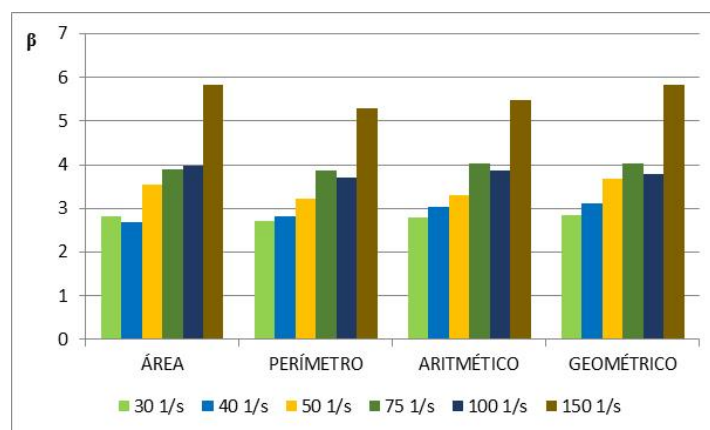


Figura 6 – Valores de β encontrados para cada tipo de diâmetro equivalente e G_f estudado.

Na avaliação de todos os diâmetros equivalentes estudados e para todos os G_f , os parâmetros β e A da equação de distribuição de tamanho de partícula podem ser visualizados através da Figura 7. Juntamente com o parâmetro A pode-se visualizar o número de partículas obtido pelo tratamento de imagem realizado e explicitado anteriormente em valores.

Analisando a Figura 7, nos resultados obtidos para o parâmetro β , observa-se que o gradiente de floculação tem influência nos valores obtidos visto que para gradientes altos, como o de 150s^{-1} estudado, os valores de β são maiores, representando menores diâmetros equivalentes encontrados como já discutido neste trabalho para todos os diâmetros equivalentes estudados. Os menores valores de β , que correspondem aos maiores valores de diâmetro encontrados para cada G_f , são respectivos ao diâmetro equivalente do perímetro, excetuando-se para o G_f de 40s^{-1} o qual resultou no menor valor de diâmetro equivalente de área.

Ainda na Figura 7 o coeficiente de densidade A encontrado corresponde e representa o número de partículas estudado para todos os G_f excetuando o G_f de 150s^{-1} o qual apresentou resultados muito inferiores aos demais. As prováveis razões da resultante do coeficiente A para o G_f de 150s^{-1} é que a distribuição de tamanho está concentrada em poucas faixas de DTP (esta distribuição pode ser visualizado na Figura 4 para todos os diâmetros equivalentes estudados) e pelo fato de que, para o G_f de 150s^{-1} , os valores de tamanho das partículas geradas ficaram abaixo do tamanho do pixel ou na mesma ordem de grandeza, de modo que estas partículas não foram amostradas pela técnica de análise de imagem e consequentemente não consideradas na contagem total.

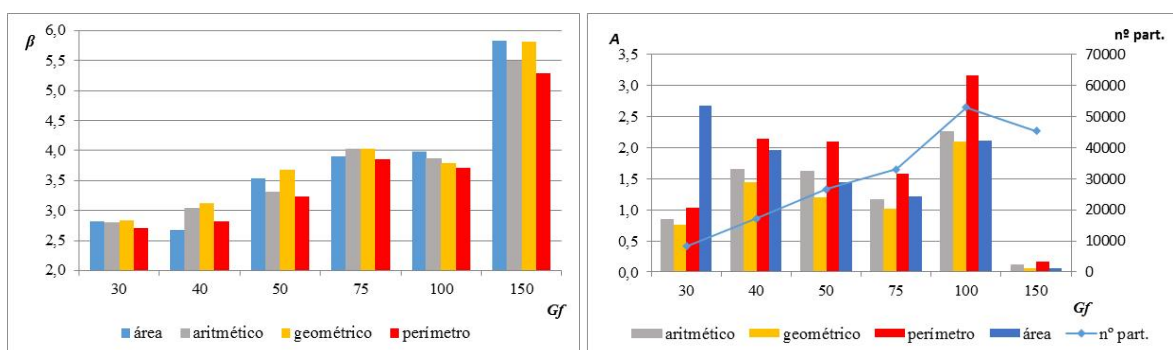


Figura 7 – Parâmetros β e A obtido da DTP para todos os G_f estudados e todos os diâmetros equivalentes. No gráfico do parâmetro A é demonstrado o valor de número de partícula.

Abaixo Tabela 1 com valores literais dos parâmetros β e A da equação de distribuição de tamanho de partícula, assim como os valores de R^2 obtido. Os valores do parâmetro β encontrados para diferentes diâmetros equivalentes e em todos os G_f estudados, apresentam uma variação do valor encontrado que correspondem com os diâmetros equivalentes calculados, no que diz respeito aos maiores valores de β , estes correspondem com os menores valores de diâmetro (em sua maioria para diâmetro geométrico). Segundo Crittenden *et. al* (2005), um valor positivo de β representa o domínio de partículas de menor tamanho, neste estudo todos os valores encontrados são positivos, percebeu-se que quanto menor o valor de β maior o diâmetro equivalente encontrado (em sua maioria para diâmetro equivalente ao perímetro).

Tabela 1 – Parâmetros β e A , bem como o valor de R^2 , obtidos pela linearização da equação de distribuição de tamanho de partícula

G_f (s^{-1})	Aritmético			Geométrico			Área			Perímetro		
	β	A	R^2	β	A	R^2	β	A	R^2	β	A	R^2
30	2,79	0,85	0,91	2,84	0,76	0,91	2,82	2,67	0,91	2,70	1,03	0,91
40	3,04	1,65	0,83	3,12	1,44	0,84	2,67	1,96	0,89	2,82	2,14	0,86
50	3,31	1,61	0,89	3,67	1,21	0,88	3,53	1,44	0,89	3,23	2,10	0,90
75	4,02	1,16	0,90	4,03	1,02	0,87	3,90	1,22	0,89	3,86	1,58	0,90
100	3,87	2,26	0,88	3,79	2,10	0,86	3,98	2,11	0,87	3,71	3,15	0,89
150	5,49	0,11	0,94	5,82	0,07	0,95	5,83	0,06	0,93	5,28	0,16	0,93

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados indicam que para cada diâmetro equivalente obtido por diferentes métodos, obtêm-se diferentes distribuições de tamanho de partículas e diferentes diâmetros médios, evidenciando sua sensibilidade conforme o método empregado e conforme formato da partícula estudada. Para a escolha do diâmetro equivalente a ser utilizado deve ser considerado as características da partícula de estudo e a resolução do método empregado. Neste estudo o diâmetro equivalente ao perímetro resultou em maiores valores de diâmetro equivalente devido à forma da partícula estudada ser mais alongada. Para partículas que se assemelham as esféricas os diâmetros equivalentes estudados convergem em semelhantes resultados de diâmetro. Portanto, recomenda-se cautela na seleção da medida representativa de tamanho de partículas e esta deve ser escolhida em função do que se deseja observar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chakraborti, R.K., Gardner, K.H., Atkinson, J.F., Benschoten, J.E. Changes in fractal dimension during aggregation. *Water Res.* 37 (4), 873 e 883, 2003.
2. Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G. *Water Treatment: Principles and Design.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
3. Jarvis, P.; Jefferson, B.; Gregory, J.; Parsons, S. A. A review of floc strength and breakage. *Water Res.* 39, p. 3121–3137, 2005.
4. JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. *Bioprocess Biosyst Eng.* v. 29, p. 185–206, 2006.
5. Moruzzi, R. B., Oliveira, A. L., De Julio, M., Dutra, R. H. A., Silva, P. A. G. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 1-8, 2016.
6. Moruzzi, R.B., Reali, M.A.P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests. *Water Science and Technology* 61 (1), 253–262, 2010.
7. Moruzzi, R. B., Reali, M.A.P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 273-283, 2007.
8. Oliveira, A. L.; Moreno, P.; Silva, P. A. G.; De Julio, M.; Moruzzi, R. B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment (Print)*, v. 2015, p. 1-12, 2015.
9. PÁDUA, V.L. Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos. 74 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
10. 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. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro - RJ, v. 9, p. 291-300, 2004.