

Coagulação-floculação de águas com turbidez ou cor elevada (Parte II)

1 Introdução

Geralmente, nos estudos realizados em laboratório, para a determinação dos parâmetros de mistura rápida e floculação e seleção de velocidades de sedimentação para diferentes tipos de coagulantes primários e auxiliares, não se tem levado em conta os mecanismos através dos quais a coagulação é efetuada de forma eficiente. Considerando-se que, na maior parte das estações de tratamento, a água bruta é proveniente de mananciais superficiais, como ocorre no Brasil, torna-se imperativo prever a possibilidade do uso da filtração direta descendente já que, durante muitos meses do ano, se tem afluente com turbidez e cor geralmente baixas. Assim, nas estações de tratamento, poderia ser previsto o desvio da água coagulada ou pré-floculada, encaminhando-a diretamente aos filtros, com economia considerável de coagulante.

Como a coagulação é uma etapa fundamental, independentemente do sistema de tratamento e qualidade da água bruta, é importante que, por ocasião da realização de ensaios de floculação, sejam investigadas com profundidade as condições segundo as quais se obtém a maior eficiência. Até há pouco tempo, considerava-se a metodologia proposta por Andreu-Villegas & Letterman (3) como sendo a mais completa para a determinação de parâmetros ótimos de mistura rápida e floculação. Entretanto, a partir da proposta de Amirtharajah & Mills (2), de um diagrama onde é mostrada a existência de duas regiões bem distintas, nas quais a coagulação é promovida eficientemente, é fundamental que sejam estudadas as condições ótimas de mistura rápida e floculação nas regiões mencionadas.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de fornecer uma metodologia para determinar os parâmetros ótimos de mistura rápida e floculação, levando-se em conta os mecanismos da coagulação por adsorção e varredura, e fornecer indicações do uso dos parâmetros obtidos em laboratório para a elaboração do projeto das unidades de uma estação de tratamento de água.

Característica	Água Tipo I	Água Tipo II
Cor Aparente (mg/l Pt-Co)	-	131,9
Cor Verdadeira (mg/l Pt-Co)	5	100
Turbidez (UT)	200	5
Alcalinidade (mg/l CaCO ₃)	30	40
Temperatura (°C)	18-23	20-23
Mobilidade Eletroforética (μ/s/V/cm)	-2,81	-
Condutância Específica (μmho/cm)	72,5	-
pH	7,5	7,5
Substâncias Húmicas (mg/l)	7	141

Quadro 1 — Características das Águas Preparadas

2 Características da instalação e águas estudadas

Para a realização de ensaios de floculação de uma forma racional, é necessária a existência de uma instalação apropriada. Recentemente, foi executada e calibrada uma instalação, cujas características principais são: (I) agitação independente em cada um dos seis jarros; (II) variação gradual do gradiente de velocidade entre 5 e 1500 s⁻¹; (III) coleta simultânea de amostras dos seis jarros.

Com essa instalação, podem ser estudados os seguintes aspectos do tratamento das águas de abastecimento: (I) mecanismos de coagulação (adsorção ou varredura) e pares de valores dosagem de coagulante — pH final para que se tenha eficiência ótima de remoção de impurezas; (II) gradiente de velocidade e tempo de agitação na mistura rápida e floculação; (III) tipos de coagulantes primários e auxiliares; (IV) velocidade de sedimentação dos flocos; (V) constantes de agregação e ruptura dos flocos.

O trabalho experimental foi realiza-

do com águas preparadas, utilizando-se de água destilada, caulinita e humatos, cujas características são apresentadas no Quadro 1.

3 Realização dos ensaios de floculação

Os ensaios foram realizados em diversas fases, cujos resultados são apresentados concomitantemente com a descrição de cada uma delas.

3.1 Determinação das dosagens ótimas de produtos químicos

Nesse trabalho, consideram-se como dosagens ótimas aquelas que, para cada mecanismo de coagulação, forneceram sobrenadantes com menor turbidez ou cor aparente residual após sedimentação. Toda vez que se mencionar uma certa dosagem de coagulante, deve-se associá-la ao pH de coagulação. Como ainda não se dispõem dos parâmetros ótimos da mistura rápida e floculação, torna-se necessário efetuar alguns ensaios preliminares para a fixação do gradiente de velocidade (G) e tempo de agitação (T). Na

Operação Processo	Gradiente de Velocidade (s ⁻¹)		Tempo de Mistura (s)	
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
Mistura Rápida	900	900	5	5
Floculação	30	15	1200	1800

Quadro 2 — Parâmetros Obtidos em Ensaio Preliminares para as Águas Tipo I e Tipo II

Característica	Mecanismo de Coagulação			
	Água Tipo I		Água Tipo II	
	Adsorção	Varredura	Adsorção	Varredura
Dosagem de sulfato de alumínio (mg/l)	10	60	20	140
pH de coagulação	4,8	6,55	4,4	6,15

Quadro 3 — Dosagens Ótimas de Sulfato de Alumínio e Valores do pH de Coagulação

mistura rápida, pode-se utilizar de três valores de G entre 200 e 1000 s⁻¹ e três de T, entre 5 e 60 s; para a floculação, pode-se, também, utilizar de três valores de G, entre 10 e 60 s⁻¹ e três de T, entre 10 e 90 minutos.

Variando a dosagem do coagulante, com uma concentração fixada (1%) e velocidade de sedimentação de 1 cm/min, foram obtidos os seguintes resultados:

Uma vez fixados os parâmetros inicialmente considerados convenientes para a mistura rápida e floculação, estudam-se as dosagens de coagulante e respectivos valores do pH de coagulação e determina-se a turbidez ou cor do sobrenadante após 10 minutos de sedimentação (velocidade de 1 cm/min). As Figuras 7 e 8 da Parte 1 mostram as regiões onde a coagulação é eficiente, destacando-se os mecanismos de adsorção e varredura. O Quadro 2 apresenta as dosagens ótimas de sulfato de alumínio e valores do pH de coagulação correspondentes a cada região.

3.2 Parâmetros químicos da mistura rápida

Esse estudo é realizado para os dois mecanismos de coagulação, con-

cada mecanismo de coagulação, a floculação com G variando entre 4 e 200 s⁻¹ e de T entre 2 e 120 min. As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam os valores da turbidez ou cor aparente residual em função do tempo de floculação e gradiente de velocidade, obtidos para a água Tipo I com temperatura entre 18 e 20°C e para a água tipo II, entre 21 e 23°C. Como se pode observar nessas figuras, o gradiente de velocidade ótimo (G*) para cada período de floculação (T) estudado é obtido em função da turbidez ou cor aparente residual mínima. Os valores de G* foram lançados em gráfico, em função dos respectivos períodos de floculação, como mostram as Figuras 5 e 6.

Segundo Andreu-Villegas & Letterman (3) os dados das Figuras 5 e 6 constituiriam retas, conforme uma equação do seguinte tipo:

$$2,8 \log G^* + \log T = \log K \quad (1)$$

onde:

G*: gradiente ótimo de velocidade (s⁻¹)

T : período de floculação (min)

K : constante

De acordo com a equação 2, o valor de G* tende a zero à medida que cresce o tempo de floculação, o que não foi verificado no presente trabalho. Na verdade, para os dois mecanismos de coagulação e ambas águas, o valor de G* tende a um valor mínimo (G'), o que pode ser verificado nas Figuras 7 e 8. Utilizando os dados experimentais, essas figuras foram construídas de modo a se maximizar o coeficiente de correlação. É interessante observar que resultado semelhante a este havia sido previsto por Argaman e Kaufman (7), que verificaram ser necessário um gradiente mínimo de velocidade para que a floculação ortocinética seja efetiva.

Nessas condições, propôs-se uma nova equação, que, na forma geral, é a seguinte:

$$(G^* - G') = K T^{-n} \quad (3)$$

Com os valores de G' (Figuras 7 e 8), foram construídas as Figuras 9 e 10, onde se têm, em ordenadas, os valores de (G* - G'). Os coeficientes de correlação resultaram muito superiores que os decorrentes do emprego da equação proposta por Villegas & Letterman (3), como mostram as Figuras 5 e 6.

As equações obtidas para os dois tipos de água estudados são apresentadas no Quadro 5.

Utilizando os dados das Figuras 1, 2, 3 e 4, foram construídas as Figuras 11 e 12, onde se tem a eficiência de remoção de turbidez ou cor aparente em função do período de floculação. O ajustamento dos dados dessas figuras conduziu à obtenção das equações apresentadas no Quadro 6.

Parâmetro	Mecanismo de Coagulação			
	Água Tipo I		Água Tipo II	
	Adsorção	Varredura	Adsorção	Varredura
Gradiente de Velocidade (s ⁻¹)	500	500	500	900
Tempo de Mistura (s)	2	5	5	5

Quadro 4 — Parâmetros ótimos da Mistura Rápida

forme dados do Quadro 3, porém mantêm-se as condições de floculação constantes do Quadro 2. Foram pesquisados valores de G entre 200 e 1200 s⁻¹ e de T entre 1 e 90 s, cujos resultados, para as duas águas, são apresentados no Quadro 4. Considera-se como parâmetro ótimo aquele para o qual a turbidez ou cor do sobrenadante resulta menor.

O Quadro 4 mostra um resultado interessante, que é a necessidade de um tempo de mistura menor (para um mesmo gradiente de velocidade) para o mecanismo de coagulação de adsorção, condição esta coerente com a literatura, quando a turbidez é elevada em relação à cor (água tipo I).

3.3 Parâmetros ótimos da floculação

Para as condições ótimas da mistura rápida, dosagens de coagulante e respectivos valores de pH, foi investigada, para os dois tipos de água e

Rearranjando a equação (1), obtêm-se:

$$(G^*)^{2,8} \cdot T = K \quad (2)$$

Água	Mecanismo de Coagulação	
	Adsorção	Varredura
Tipo I	(G*-7,9) = 292,1034.(T) ^{-1,6657} (4)	(G*-11,5) = 309,98.(T) ^{-1,894} (5)
Tipo II	(G*-5,2) = 264,1456.(T) ^{-1,0116} (6)	(G*-2,8) = 95,9028.(T) ^{-1,0661} (7)

G*: gradiente ótimo de velocidade (s⁻¹)
T : tempo de floculação (min)

Quadro 5 — Equações que Relacionam Gradiente Ótimo de Velocidade com Período de Floculação

Água	Mecanismo de Coagulação	Equação da Eficiência
Tipo I	Adsorção	(T _F /T _I) = 235,32 . (T) ^{-0,8847} (8)
	Varredura	(T _F /T _I) = 146,55 . (T) ^{-1,2303} (9)
Tipo II	Adsorção	(C _F /C _I) = 378,02 . (T) ^{-0,6736} (10)
	Varredura	(C _F /C _I) = 78,70 . (T) ^{-0,8092} (11)

T_I, T_F: turbidez inicial e final (UT)

C_I, C_F: cor aparente inicial e final (un. Pt-Co)

T : tempo de floculação (min)

Quadro 6 — Eficiência de Remoção em função dos Mecanismos de Coagulação para as Águas Estudadas

3.4 Concentração do coagulante

Os estudos anteriores foram efetuados com solução de sulfato de alumínio com as seguintes concentrações: 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3,5; 5; 7; 10%.

Para todos os ensaios desta fase,

Para todos os ensaios desta fase,

Parâmetro	Água Tipo I		Água Tipo II	
	Adsorção	Varredura	Adsorção	Varredura
- Dosagem de sulfato de alumínio (mg/l)	10	60	20	140
- pH de coagulação	4,8	6,55	4,4	6,15
- Mistura Rápida				
- G (s ⁻¹)	500	500	500	900
- T (s)	5	2	5	5
- Floculação				
- G* (s ⁻¹)	8,9	12,6	8,8	5,4
- T (min)	30	20	30	70

Quadro 7 — Parâmetros de Mistura Rápida, Floculação e Dosagens de Coagulante para os Ensaios de Verificação da Influência da Concentração do Coagulante

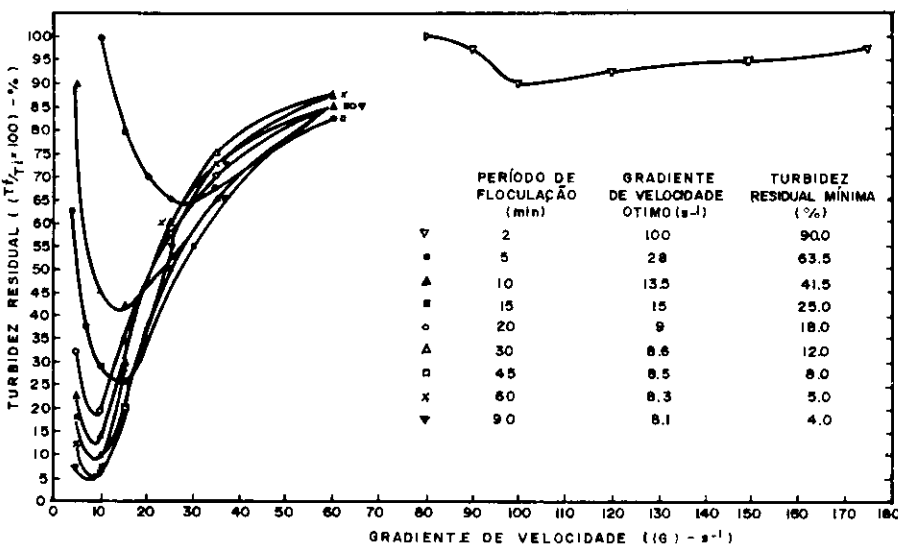


Figura 1 — Curvas de variação da turbidez residual em função do gradiente de velocidade para vários períodos de floculação; água Tipo I; mecanismo: adsorção (dosagem = 10 mg/l; pH = 4,8); período de sedimentação: 5 min.

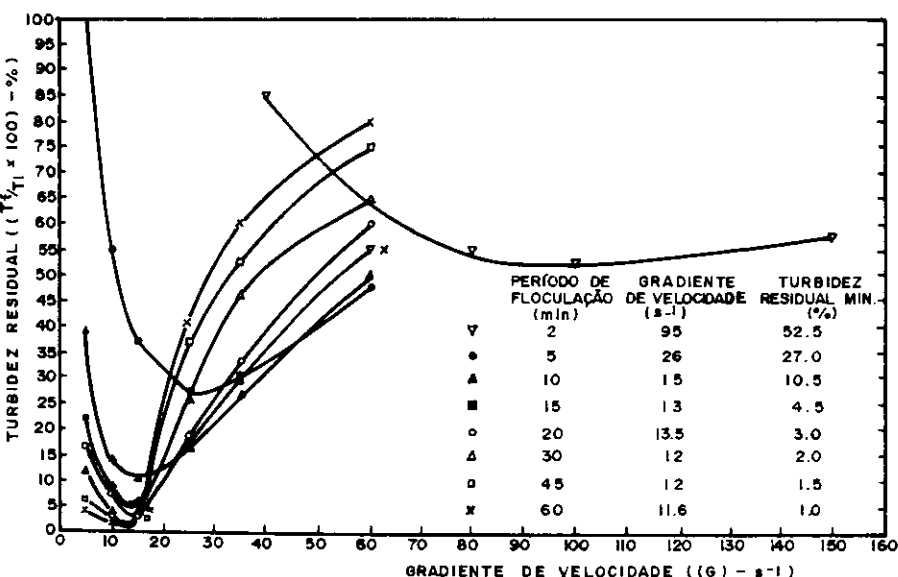


Figura 2 — Curvas de variação da turbidez residual em função do gradiente de velocidade para vários períodos de floculação; água Tipo I; mecanismo de coagulação: varredura (dosagem = 60 mg/l; pH = 6,55); período de sedimentação: 5 min.

Com o objetivo de verificar a influência da concentração do coagulante na velocidade de sedimentação dos flocos, foram executados ensaios de flo-

foram utilizados os parâmetros anteriormente determinados, resumidos no Quadro 7.

Foram coletadas amostras do sobrenadante dos jarros nos tempos de 1,

3, 7, 12, 20 e 30 minutos após o período de floculação. As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam os resultados obtidos, onde se têm, em ordenadas, a porcentagem da turbidez ou cor aparente remanescente que sedimenta com velocidade menor ou igual à constante da figura e, em abscissa, a concentração da solução de sulfato de alumínio.

Para a água Tipo I, que apresenta turbidez elevada em relação à cor, a concentração do coagulante parece não exercer influência significativa na velocidade de sedimentação dos flocos formados, para os dois mecanismos de coagulação. Entretanto, para a água Tipo II, que tem cor elevada em relação à turbidez, os melhores resultados são obtidos com a concentração do coagulante compreendida entre 0,5 e 1,0% para os dois mecanismos de coagulação.

4 Utilização dos parâmetros obtidos em laboratório

Alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos há algum tempo, procurando-se relacionar a eficiência de remoção de partículas primárias de uma suspensão, em função do tempo de floculação e gradiente de velocidade. Estes modelos foram desenvolvidos, principalmente, por Argaman e Kaufman (6, 7) e Harris (28). A seguir, são apresentados os modelos matemáticos em função do tipo de reator utilizado.

A — Reator Estático ou com Fluxo de Pistão

A equação na forma integrada que relaciona os parâmetros da floculação para um reator estático é:

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{K_B}{K_A} \cdot G + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} \cdot G \right) e^{-K_A \cdot G \cdot T} \quad (12)$$

onde:

N_t: número de partículas primárias no tempo t

N₀: número inicial de partículas primárias

G: gradiente de velocidade (s⁻¹)

T: tempo de floculação (s)

K_A: constante de agregação

K_B: constante de ruptura (s)

A primeira derivada parcial da equação 12 em relação a G, igualada a zero, fornece:

$$K_B = \frac{K_A^2 \cdot T \cdot e^{-K_A \cdot T_d \cdot G^*}}{1 + K_A \cdot T_d \cdot G^* \cdot e^{-K_A \cdot T_d \cdot G^*} - e^{-K_A \cdot T_d \cdot G^*}} \quad (15)$$

O valor de K_A e K_B pode ser determinado a partir dos estudos de laboratório, para um tempo de floculação considerado satisfatório. Utilizan-

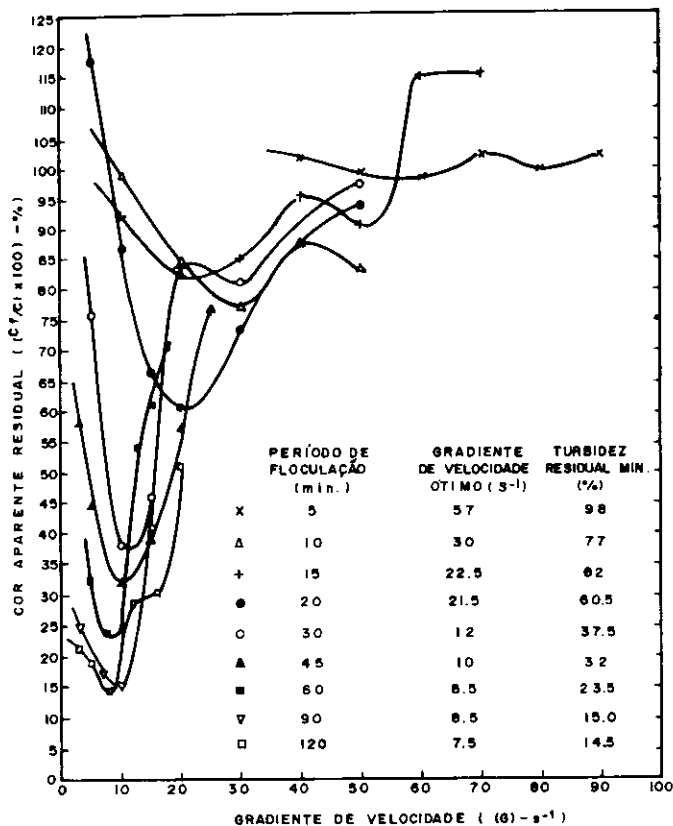


Figura 3 — Curvas de variação da cor aparente residual em função do gradiente de velocidade para vários períodos de flocação; água Tipo II; mecanismo de coagulação; adsorção (dosagem = 20 mg/l; pH = 4.40); período de sedimentação: 5 min.

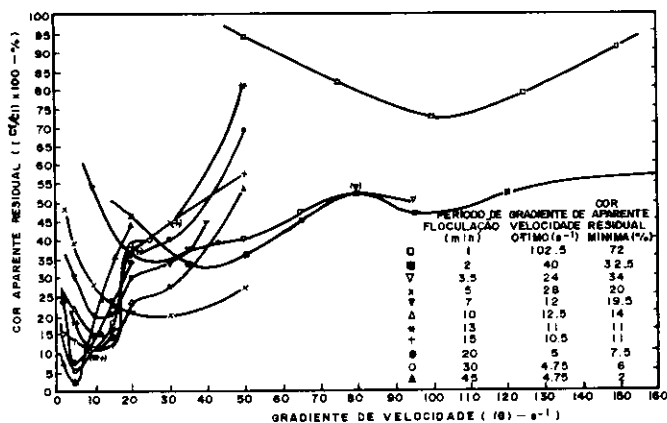


Figura 4 — Curvas de variação da cor aparente residual em função do gradiente de velocidade para vários períodos de flocação; água Tipo II, mecanismo de coagulação; varredura (dosagem = 140 mg/l; pH = 6.15); período de sedimentação: 5 min.

do os tempos de flocação do Quadro 7 e as equações 8, 9, 10 e 11, obtêm-se os dados apresentados no Quadro 8, onde também se encontram incluídos os valores de G^* e T .

Com os dados do Quadro 8 e as equações 12 e 13, foram determinadas as constantes K_A e K_B , apresentadas no quadro 9.

Água	Mecanismo de Coagulação					
	Adsorção			Varredura		
	T_F/T_i ou C_F/C_i (%)	$G^*(s^{-1})$	$T(s)$	T_F/T_i ou C_F/C_i (%)	$G^*(s^{-1})$	$T(s)$
Tipo I	11,61	8,9	1800	3,67	12,6	1200
Tipo II	38,24	8,8	1800	2,53	5,4	4200

Água	Mecanismo de Coagulação			
	Adsorção		Varredura	
	K_A	$K_B(s)$	K_A	$K_B(s)$
Tipo I	$2,25 \times 10^{-4}$	$2,315 \times 10^{-6}$	$3,38 \times 10^{-4}$	$8,07 \times 10^{-7}$
Tipo II	$1,15 \times 10^{-4}$	$3,39 \times 10^{-6}$	$2,43 \times 10^{-4}$	$9,84 \times 10^{-7}$

Quadro 8 — Valores da Eficiência de Remoção e Gradiente Ótimo de Velocidade

Quadro 9 — Valores das Constantes K_A e K_B

onde:

N_0 : número inicial de partículas primárias

N_1 : número de partículas primárias no afluente do reator (m-1)

m : número de reatores em série

T : período de flocação (s)

Quando se tem um único reator (m=1), a equação 14 transforma-se em:

$$\frac{N_1^0}{N_1^1} = \frac{1 + K_A \cdot G \cdot T}{1 + K_B \cdot G^2 \cdot T} \quad (15)$$

A Figura 17 mostra o efeito da compartimentação da unidade de flocação na eficiência de remoção de partículas primárias. As curvas apresentadas, para um e quatro reatores, foram traçadas mediante o uso da equação 14, com $K_A = 5,1 \times 10^{-5}$ e $K_B = 1,1 \times 10^{-7}$ s(7). Observando-se a Figura 17, nota-se que: (I) para uma certa eficiência, existe um tempo mínimo de flocação, abaixo do qual essa eficiência não é obtida, independentemente do valor de G; (II) para um certo tempo de flocação, há um valor ótimo de G, acima do qual a ruptura é mais significativa que a agregação; (III) para uma certa eficiência o tempo total de flocação requerido é menor quando a unidade de flocação é compartimentada.

A aplicação das equações 14 e 15, a partir de dados obtidos em laboratório, pode ser exemplificada como mostrado a seguir, onde se deseja determinar a eficiência de remoção em unidade de flocação com um e três reatores em série, para água coagulada através do mecanismo de varredura.

Água Tipo I:

$T = 1.200$ s; $G = 12,6$ s⁻¹;

$K_A = 3,38 \times 10^{-4}$; $K_B = 8,07 \times 10^{-7}$ s

$$\frac{N_1^0}{N_1^1} = 5,3 \text{ (81,1\%)} \text{ para um reator}$$

$$\frac{N_1^0}{N_1^1} = 12,3 \text{ (91,9\%)} \text{ para três reatores}$$

Água Tipo II:

$T = 4.200$ s; $G = 5,4$ s⁻¹; $K_A = 2,43$

$\times 10^{-4}$; $K_B = 9,84 \times 10^{-7}$ s

$$\frac{N_1^0}{N_1^1} = 5,81 \text{ (82,8\%)} \text{ para um reator}$$

$$\frac{N_1^0}{N_1^1} = 15,07 \text{ (93,36\%)} \text{ para três reatores}$$

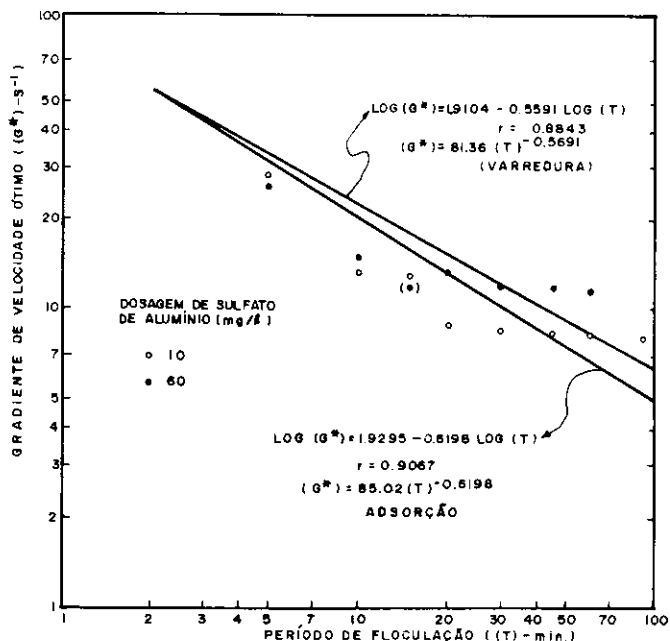


Figura 5 — Curvas de variação do gradiente de velocidade ótimo em função do período de flocação - modelo de Andreu-Villegas e Letterman - água Tipo I; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

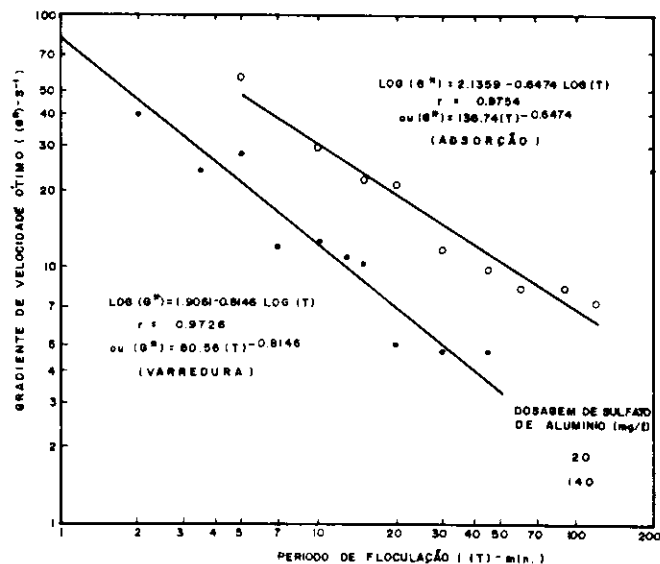


Figura 6 — Curvas de variação do gradiente de velocidade ótimo em função do período de flocação - modelo de Andreu-Villegas e Letterman; água Tipo II; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

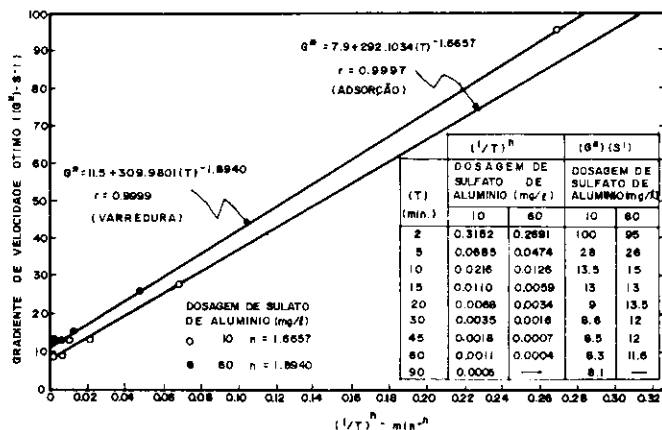


Figura 7 — Curvas de variação do gradiente de velocidade ótimo em função de $(1/T)^n$ para a água I; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

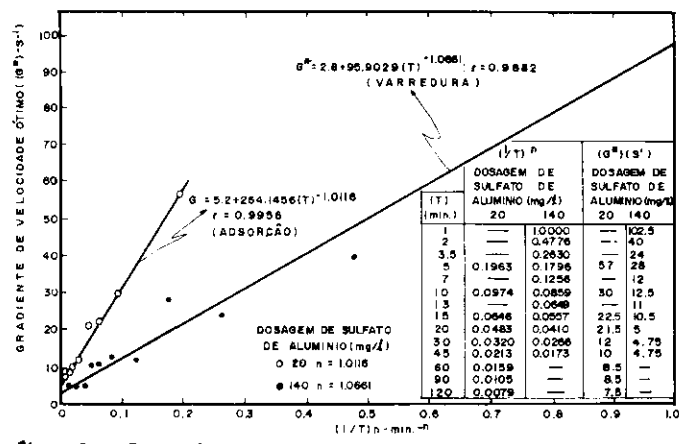


Figura 8 — Curvas de variação do gradiente de velocidade ótimo em função de $(1/T)^n$ para a água tipo II; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

5 Considerações finais

Com base no trabalho experimental realizado, concluiu-se que:

- para as condições ótimas de flocação, existe um gradiente de velocidade mínimo (G') que deve ser aplicado para períodos de flocação relativamente elevados, levando à proposição de um modelo matemático diferente daquele apresentado por Andreu-Villegas & Letterman; a equação representativa do modelo proposto nesse trabalho é $(G^* - G') = KT^{-n}$ que se ajustou melhor aos dados em relação à daqueles autores, que é uma equação do tipo $G^* T^n = K$;

- o período de agitação que otimiza a flocação quando a coagulação é realizada através da varredura é inferior ao que se obtém quando a coagulação é realizada pela adsorção para as duas águas estudadas;

- a remoção de turbidez ou cor aparente, através da sedimentação com determinada velocidade, é maior quando a coagulação é realizada através do mecanismo de varredura do que quando ela é realizada pelo mecanismo de adsorção para as duas águas estudadas;

- a concentração da solução de sulfato de alumínio parece não exercer influência significativa na eficiência da sedimentação, para os dois mecanismos de coagulação da água Tipo I; para a água Tipo II, a concentração do coagulante que conduz a melhores resultados encontra-se entre 0.5 e 1.0%.

Os parâmetros obtidos em laboratório podem ser usados para o projeto de unidades de flocação, permitindo que sejam feitas previsões da eficiência de remoção de partículas primárias em função do número de câmaras em série.

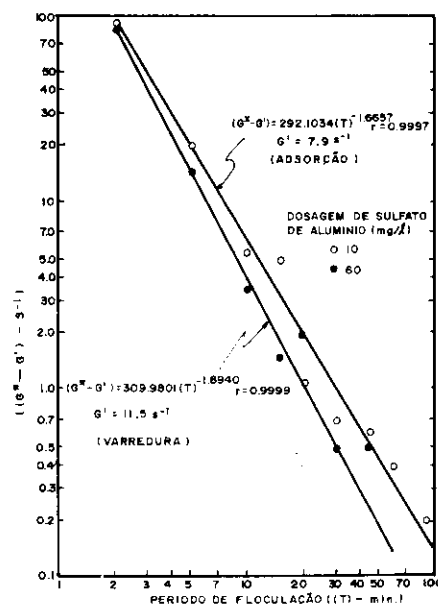


Figura 9 — Curvas de variação de $(G^* - G')$ em função do período de flocação - modelo proposto - água Tipo I; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

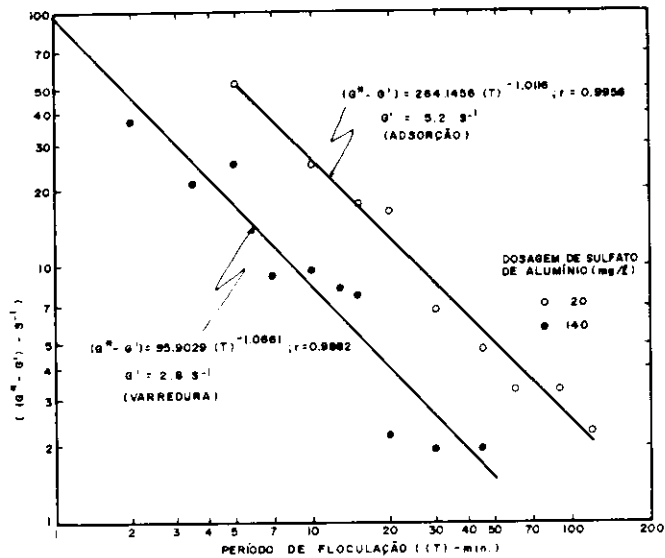


Figura 10 — Curvas de variação de $(G^2 - G^1)$ em função do período de floculação — modelo proposto — água Tipo II; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

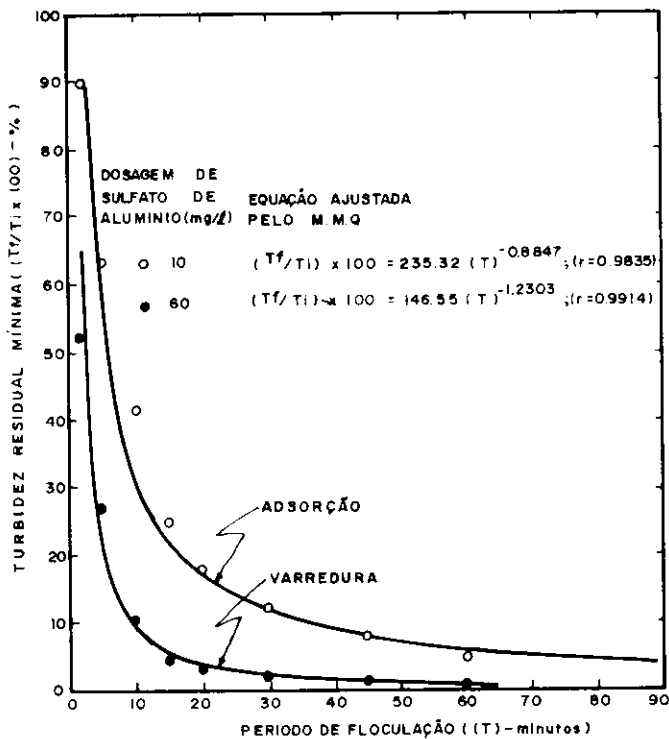


Figura 11 — Curvas de variação da turbidez residual mínima em função do período de floculação para a água Tipo I; mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

6 Referências bibliográficas

- ALAERTS, G. & VAN HAUTE, A. "Stability of Colloid types optimal Dosing in Water Flocculation". In: PAWLOWSKI L., *Methods For Water and Wastewater Treatment*. E. Elsevier, 1982 p. 12 - 29.
- AMIRTHARAJAH, A. & MILLS, Kirk M. "Rapiad — mix design for mechanisms of alum coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **74** (4): 210 - 216, Apr., 1982.
- ANDREU — VILLEGAS, R. & LETTERMAN, Raymond D., "Optimizing Flocculator Power Input". *J. Environmental Eng. Div. ASCE*, **102**: 251-263, Apr. 1976.
- APHA, AWWA, WPCF — "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 16.ª ed. Washington, 1985 e 1268 p.
- ARAÚJO, Roque Angélico — "Emprego da Coagulação — Flocculação na Remoção de: Substâncias Húmicas (Cor) de Águas para Abastecimento". São Carlos, 1985. 272 p. Dissert. (mest. hidr. san.) — Escola de Eng. de S. Carlos — Univ. S. Paulo.
- ARGAMAN, Y. A. "Pilot — Plant studies of Flocculation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **63**: 775-777, 1971.
- ARGAMAN, Yerachmiel & KAUFMAN, Warren J. — "Turbulence and Flocculation". *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, SA2, vol. 92, 233-241, Apr. 1970.
- BABCOCK, D. B. e SINGER, P. C. — "Chlorination and Coagulation of Humic and Fulvic Acids". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **71** (3): 149 - 152, Mar., 1979.
- BLACK, A. P. & CHRISTMAN, R. F. — "Characteristics of Colored Surface Waters". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **55** (6): 753 - 770, June, 1963.
- BLACK, A. P. & CHRISTMAN, R. F. "Chemical Characteristic of Fulvic Acids". *J. AWWA*, **55** (7): 897 - 912, Jul., 1963.
- BLACK, A. P. & HANNAH, Sidney A. "Electrophoretic Studies of Turbidity Removal by Coagulation With Aluminum Sulfate". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **53** (4): 439 - 451, Apr., 1961.
- BLACK A. P. & WILLEMS, D. G. — "Electrophoretic Studies of Coagulation for Removal of Organic Color". *J. AWWA*, **53** (5): 589 - 604, May, 1961.
- BLACK, A. P. et alii — "Stoichiometry of the Coagulation of Color Causing Compounds With Ferric Sulfate". *J. AWWA*, **55** (7): 897 - 912, Jul. 1963.
- CAMP, Thomes R. & STEIN, P. C. — "Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion". *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, vol. 30, n.º 4, pp. 219 - 237, Oct., 1943.
- CAMPOS, José Roberto — "Emprego de Amido de Batata como Auxiliar de Flocculação de Águas para Abastecimento". São Carlos, 1980. 179 p. Tese (Dout. hidr. san.) — Escola de Eng. de São Carlos — Univ. São Paulo.
- CARRION, José M. Pérez & VARGAS, Lidia Canepa, de "Processos Unitários — Laboratório/Floculação". In: OPS/EHP/CEPIS, *Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de mejoramiento de calidad de aguas para consumo humano*. 1981.
- CEPIS. *Teoría, Diseño Y Control de los Procesos de Clarificación del Agua*. Lima, Peru, 1973. 558 p.
- CHRISTMAN, R. F. & GHASSEMI, M. — "Chemical Nature of Organic Color in Water". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **58** (6): 723 - 741, June, 1966.
- COMMITTEE REPORT — "Organics Removal by Coagulation: A review and research needs". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **71** (10): 588 - 603, Oct. 1979.
- DEMPSEY, Brian A. et alii — "Polyaluminum Chloride and Alum Coagulation of Clan — Fulvic Acid Suspensions". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **77** (3): 74 - 80, Mar., 1985.
- DHARMARAJAH, Anthonisamy Herman — "Direct Filtration of Hemic Substances With Alum and Polymer". Ames, 1979. 144 p. Thesis (master) Iowa State University.
- DI BERNARDO, Luiz — "Tratamento de águas de abastecimento de cor elevada". *Revista DAE*, São Paulo, n.º 133, 61 - 65, Jun. 1983.
- EDWARDS, Gerald A. & AMIRTHARAJAH, A. — "Removing Color Caused by Humic Acids". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **77** (3): 50 - 57, Mar. 1985.
- EDZWALD, J. K. et alii — "Polymer Coagulation of Humic Acid Waters". *J. Environmental Engineering Division*, **103** (EE6): 989 - 1.000, Dec. 1977.
- GRIFFITH, J. David & WILLIAMS, Robert G. — "Application of Jar — Test Analysis at Phoenix, Ariz.". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **64** (12): 825 - 830, Dec., 1972.

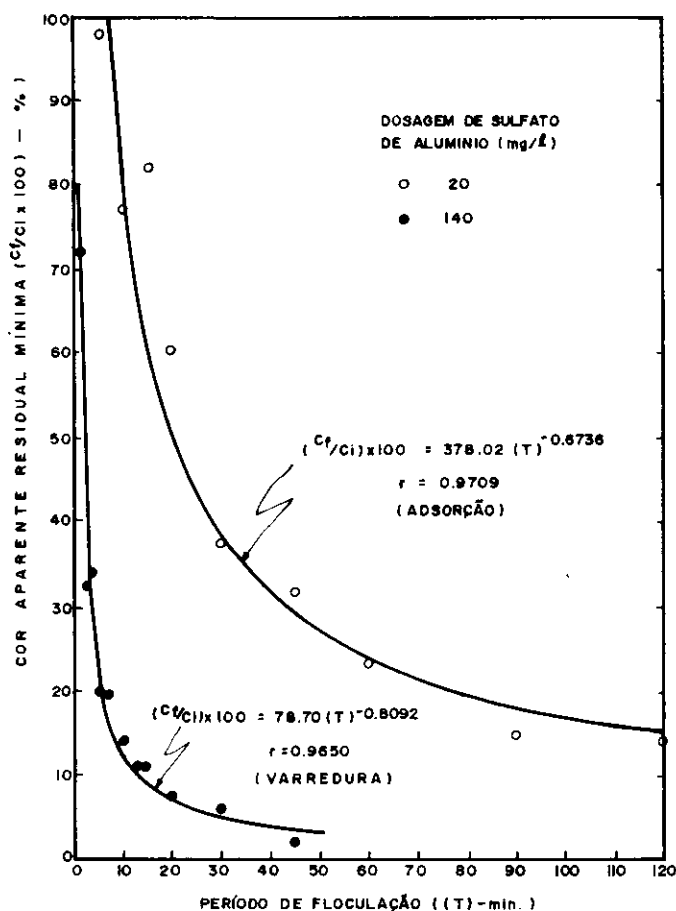


Figura 12 — Curvas de variação da cor aparente residual mínima em função do período de floculação para a água Tipo II. Mecanismos de coagulação: adsorção e varredura

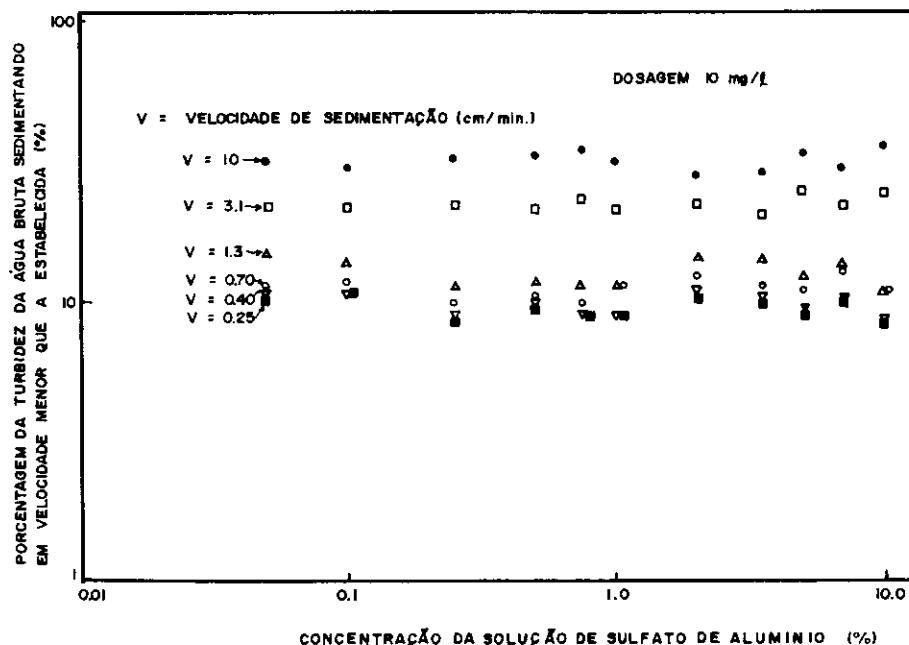


Figura 13 — Variação da porcentagem da turbidez da água preparada que sedimenta em velocidade menor que a estabelecida em função da concentração da solução de sulfato de alumínio; água Tipo I; mecanismo de coagulação; adsorção (dosagem = 10 mg/l; pH = 4.8)

(26) GUPTA, V. S. et alii — "Zeta Potential Control for Alum Coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **67** (1): 21 - 23, Jan., 1975.

(27) HALL, Eric S. & PACKHAM, Ronald F. — "Coagulation of Organic Color With Hydrolyzing Coagulants". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **57** (9): 1.149 - 1.165, Sep., 1965.

(28) HARRIS, Howard S. et alii — "Orthokinetic Flocculation in Water Purification". *Journal of the Sanitary Engi-*

neering Division, *ASCE*, SA 6, vol. 92. 95 - 111, Dec., 1966.

(29) HUDSON, H. E. Jr. — "Physical Aspects of Flocculation". *J. AWWA*, Denver, Col., **57** (7): 885 - 892, Jul. 1965.

(30) HUDSON, H. E. Jr. — "Evaluation of Plant Operating and Jar — Test Data". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **65** (5): 368 - 375, May., 1973.

(31) HUDSON, H. E. Jr. — "Water Clarification Processes Practical Design and

Evaluation". Litton Company International Publishing, Inc., 1981.

(32) JEFFCOAT, W. Blake & SINGLEY, J. Edward — "The Effect of Alum Concentration and Chemical — Addition Times on Coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **67** (4): 177 - 181, Apr., 1975.

(33) JIRGENSONS, B. & STRAUMANIS, M. E. — "A Short Textbook of Colloid Chemistry". 2.ª ed. New York. The Macmillan Company, 1962. 500 p.

(34) KAWAMURA, Susumu — "Coagulation Consideration". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **65** (6): 417 - 423, Jun., 1973.

(35) LAI, Ruey J. et alii — "Velocity Gradient Calibration of Jar — Test Equipment". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **67** (10): 553 - 557, Oct., 1975.

(36) MANGRAVITE, Francis J. et alii — "Removal of Humic Acid by Coagulation and Microflotation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **67** (02): 88-94, Feb., 1975.

(37) MATIJEVIC, E., ABRAMSON, M. B., OTTEWILL, R. H., SCHULZ, K. F. & KERKER, M. — "Adsorption of Thorium Ions on Silver Iodide Sols". *J. of Physical Chemistry*, New York, **65** (10): 1.724 - 1.729, Oct., 1961.

(38) MATIJEVIC, E., ABRAMSON, M. B., SCHULZ, K. F. & KERKER, M. — "Detection of Metal Ion Hydrolysis by coagulation". *J. Physical Chemistry*, New York, **64**: 1.157 - 1.161, Sep., 1960.

(39) MATIJEVIC, E., COUCH, J. P. & KERKER, M. — "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. IV. Zinc". *J. Of Physical Chemistry*, New York, **66**: 111 - 114, Jan. 1962.

(40) MATIJEVIC, Egon & JANAUER, Gilbert E. — "Coagulation and Reversal Of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metals Ions. II, Ferric Nitrate". *J. Of Colloid and Interface Science*, New York, **21**: 197 - 223, 1966.

(41) MATIJEVIC, E., JANAUER, G. E. & KERKER, M. — "Reversal of Charge of Lyophobic Colloid by Hydrolyzed Metal Ions I. Aluminum Nitrate". *J. of Colloid Science*, New York **19**: 333 - 346, 1964.

(42) MATIJEVIC, E. MATHAI, K. G. & KERKER, M. — "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. V. Zirconium". *J. of Physical Chemistry*, New York, **66**: 1.799 - 1.803, Oct., 1962.

(43) MATIJEVIC, E., MATHAI, K. G. OTTEWILL, R. H. & KERKER, M. — "Detection of Metal Ion Hydrolysis by Coagulation. III. Aluminum". *J. of Physical Chemistry*, New York, **65**: 826 - 830, May, 1961.

(44) MATIJEVIC, E. & STRYKER, L. J. — "Coagulation and Reversal of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metals Ions. III. Aluminum sulfate". *J. of Colloid and Interface Science*, New York, **22**: 68 - 77, 1966.

(45) MATIJEVIC, E. & TEZAK, B. — "Coagulation Effects of Aluminum Nitrate and Aluminum Sulfate on Aqueous

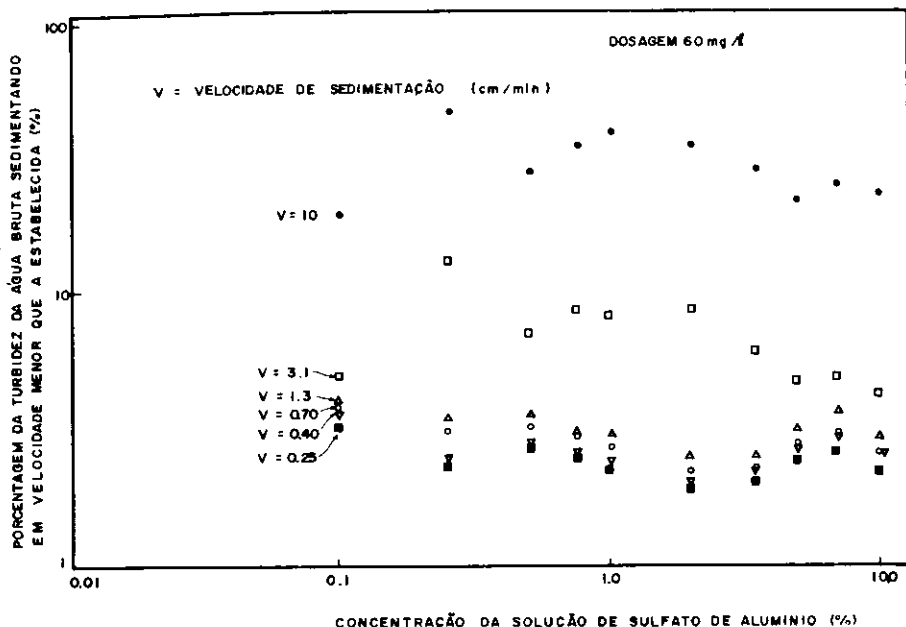


Figura 14 — Variação da porcentagem da turbidez da água preparada que sedimenta em velocidade menor que a estabelecida em função da concentração da solução de sulfato de alumínio; água Tipo I; mecanismo de coagulação; varredura (dosagem = 6,0 mg/l; pH = 6,55)

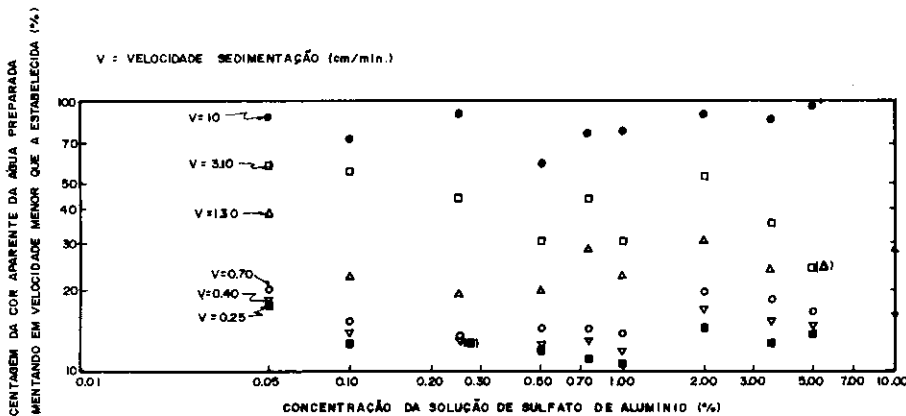


Figura 15 — Variação da porcentagem da cor aparente da água preparada que sedimenta em velocidade menor que a estabelecida em função da concentração da solução de sulfato de alumínio, água Tipo II; mecanismo de coagulação; adsorção (dosagem = 20/l; pH = 4,4)

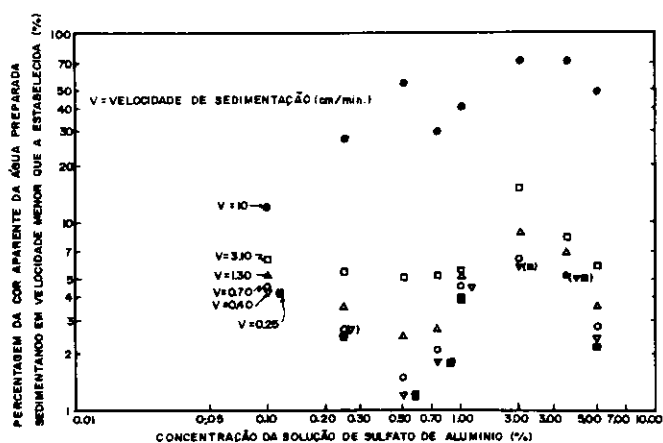


Figura 16 — Variação da porcentagem da cor aparente da água preparada que sedimenta em velocidade menor que a estabelecida em função da concentração da solução de sulfato de alumínio; água Tipo II; mecanismo de coagulação; varredura (dosagem = 140 mg/l; pH = 6,15)

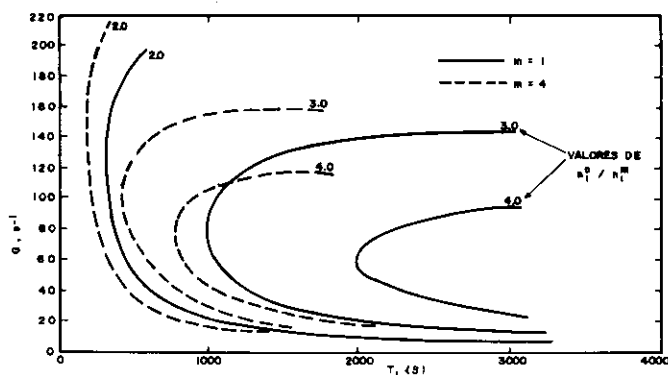


Figura 17 — Correlação entre eficiência de floculação, número de câmaras (m) e os parâmetros G e Td (Argaman e Kaufman [6])

[48] NARKIS, N. & REBHUN, M. — "The mechanism of Flocculation Process in the presence of Humic Substances". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **67** (2): 101 — 108, Feb. 1975.

[49] PACKHAM, R. F. — "The Coagulation Process. I. Effect of pH and the Nature of the turbidity". *J. Appl Chem.*, **12**: 556 — 564, Dez. 1962.

[50] PACKHAM, R. F. — "The Coagulation Process. II. Effect of pH on the Precipitation of Aluminum Hydroxide". *J. Appl. Chem.*, **12**: 564 - 568, Dez., 1962.

[51] ROOK, J. J. — "Haloforms in Drinking Water". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **68** (3): 168, Mar., 1976.

[52] SANKS, Robert L, ed. — *Water Treatment Plant Design*. Michigan, Ann Arbor Science Publishers, Inc., c. 1979, 845 p.

[53] STEVENS, A. A. et al. — "Chlorination of Organics in Drinking Water". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **68** (11): 615, Nov., 1976.

[54] STUMM, Werner & MORGAN, James J. — "Chemical Aspects of Coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **54** (8): 971 — 992, Aug., 1962.

[55] STUMM, Werner & O'MELIA, Charles R. — "Stoichiometry of Coagulation". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **60** (5): 514 — 539, May., 1968.

[56] TOLEDO, A. P. P. de — "Comunicação Pessoal".

[57] TOLEDO, A. P. P. de — "Contribuição ao Estudo Físico-Químico de Ácido Húmico Extraído de Sedimento". São Paulo, 1973, 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo.

[58] VIK, Eilen A. et alii — "Removing Aquatic Humus From Norwegian Lakes". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **77** (3): 58 — 66, Mar. 1985.

[59] WEBER, Walter J. Jr. & JODELLAH, Abdullah M. — "Removing Humic

Sols of Silver Halides in statu Nascenti. Detection of Polynuclear Complex Aluminum Ions by Means of Coagulation Measurements". *J. Physical Chemistry*, New York, **57**: 951 — 954, Dec. 1953.

[46] MIDWOOD, R. B. & FELBECK — "Analysis of Yellow Organic Matter from

Freshwater". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **60** (3): 357, Mar., 1968.

[47] MOORE, G. N. — Interaction of Fulvic Acids and Koalinite during Coagulation, presented at the 97th annual conference of the American Water Works Association Anaheim, California, May 8 — 13, 1977.

Substances by Chemical Treatment and Adsorption". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **77** (4): 132 — 137, Apr. 1985.

[60] WILLIAMS, Robert L. — "Microelectrophoretic Studies of Coagulation With Aluminum Sulfate". *J. AWWA*, Denver, Colorado, **57** (6): 801 — 810, Jun., 1965.