

COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN FLÓCULOS LASTRADOS CON DIFERENTES TAMAÑOS DE MICROARENAS

SETTLING VELOCITY BEHAVIOR IN BALLASTED FLOCS WITH DIFFERENT MICROSAND SIZES

ANA GHANEM, GIOVANNI PAULESU, FREDDY CAMPOS, PETRA RODRÍGUEZ

*Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
Departamento de Ingeniería Civil, Centro de Estudios Ambientales
E-mail: anaghanem@cantv.net*

RESUMEN

Se estudió el comportamiento de la velocidad de sedimentación en flóculos lastrados con diferentes tamaños de microarenas. Para la formación de flóculos químicos se preparó una solución de ensayo donde se agregaron dosis de 250,00 mg/L de un coagulante y 5,00 mg/L de un polímero aniónico como ayudante de la floculación. Los coagulantes utilizados fueron sulfato de aluminio y cloruro de Fe (III). Para la formación de flóculos lastrados, se utilizó el mismo procedimiento y adicionalmente se agregó una microarena como agente lastrante, con dosis comprendidas entre 1,00 y 4,00 g/L. Se realizaron ensayos de granulometría para la selección de los diámetros de microarena a utilizar: 0,275 mm; 0,215 mm; 0,165 mm; 0,138 mm y 0,116 mm. Las velocidades de sedimentación de flóculos químicos (sin microarena) y lastrados se determinaron a través de pruebas de sedimentación libre. Se comprobó que la velocidad de sedimentación se incrementa a medida que aumenta la dosificación del agente lastrante, con una relación de tipo lineal entre ambas. Sin embargo, de los resultados experimentales, no se pudo predecir un comportamiento de la velocidad de sedimentación en función del tamaño de la microarena. Las velocidades de sedimentación variaron entre 28,00 y 40,00 m/h para los flóculos químicos y entre 145,00 y 225,00 m/h para los flóculos lastrados, encontrándose las mayores velocidades para los flóculos lastrados formados con tamaños de microarena de 0,275 mm; 0,215 mm y 0,116 mm.

PALABRAS CLAVE: Floculación, flóculos lastrados, velocidad de sedimentación, tamaños de microarenas, agente lastrante.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study the settling velocity behavior in ballasted flocs with different microsand sizes. To form chemical flocs, a coagulant dose of 250 mg/L and a polymer dose of 5 mg/L were added to a test solution. Aluminum sulfate and ferric chloride were used as coagulants. Ballasted flocs were formed by using the same procedure and adding a microsand as the ballasting agent, with doses between 1,00 and 4,00 g/L. Grain size distribution tests were conducted for selection of microsand diameters to be used: 0,275 mm; 0,215 mm; 0,165 mm; 0,138 mm and 0,116 mm. Settling velocities for chemical flocs (without microsand) and ballasted flocs were determined through free-settling tests. It was confirmed that floc settling velocity increases as the ballasting agent dose increases, with a linear relationship between them. However, from experimental results, it could not be predicted a behavior of the settling velocity as a function of the microsand size. Settling velocities ranged between 28,00 and 40,00 m/h for chemicals flocs and between 145,00 and 225,00 m/h for ballasted flocs, in which the greatest settling velocities were found for ballasted flocs formed with microsand sizes of 0,275 mm, 0,215mm and 0,116 mm.

KEY WORDS: Flocculation, ballasted flocs, settling velocity, microsand sizes, ballasting agent.

INTRODUCCIÓN

En términos generales, la floculación lastrada es un proceso de clarificación mejorada que consiste en la adición de un aditivo granular comúnmente conocido como agente lastrante. Este agente, generalmente una microarena cuyos diámetros oscilan en su mayoría entre 0,1 a 0,3 mm, se agrega a una suspensión de partículas sólidas coaguladas y químicamente estabilizadas. Una vez agregado, el agente lastrante se incorpora dentro de la matriz de los precipitados químicos y partículas sólidas (flóculos) para formar un flóculo lastrado (Cailleaux *et al.* 1992, Chang *et al.* 1998; Desjardins *et al.* 2002, Young y Edwards 2003; Ghanem *et al.* 2007). Los flóculos lastrados, debido a su incremento

en diámetro y densidad por la adición del agente lastrante, se sedimentan a una tasa mucho mayor que los flóculos no lastrados. La sedimentación es un proceso utilizado frecuentemente en la potabilización de aguas y tratamiento de aguas residuales para la separación de partículas en un fluido. En general, el diseño y operación de un proceso de sedimentación requiere un entendimiento de las propiedades físicas de esas partículas o flóculos, tales como la densidad y el tamaño. Pocas investigaciones se han realizado para evaluar el comportamiento de la velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados. Entre ellos se encuentra el trabajo realizado por Young y Edwards (2003), en el cual se demostró que existe una serie de factores que afectan la velocidad de sedimentación de estos flóculos, los

cuales incluyen el tamaño, la densidad y la forma de los mismos. En otro trabajo de investigación (Cailleaux *et al.* 1992), se utilizaron diferentes tamaños de microarena (entre 30 y 400 μm) para demostrar que la velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados aumenta en la medida que aumenta el tamaño de los granos de ese agente lastrante. Sin embargo, en ese trabajo no se determinó una fórmula para la velocidad de sedimentación que incluyera esta variable. Basado en el análisis de investigaciones previas realizadas por otros investigadores (Tambo y Watanabe 1979, Li y Ganczarzyk 1987, Lee *et al.* 1996, Jiang y Logan 1991, Johnson *et al.* 1996, Adachi y Tanaka 1997, Wu y Lee 1998), Ghanem (2002) sugirió un modelo para la velocidad de sedimentación en flóculos lastrados. El modelo propuesto tampoco incluyó la relación entre la velocidad de sedimentación y el tamaño del agente lastrante. De acuerdo a las consideraciones anteriores, el presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el propósito de lograr un mejor entendimiento del comportamiento de la velocidad de sedimentación en flóculos lastrados en función del tamaño de los granos del agente lastrante, en este caso, una microarena.

METODOLOGÍA

El programa experimental fue diseñado según las siguientes actividades: a) preparación del agente

lastrante; b) preparación de los flóculos; c) realización de pruebas de sedimentación libre y d) procesamiento y análisis estadístico de los resultados.

Preparación del agente lastrante: El material utilizado como agente lastrante consistió de una microarena silíceas suministrada por la empresa QUIMOR, C.A, la cual proviene de unas minas ubicadas en la Mesa de Guanipa, y que se utiliza para el proceso de floculación lastrada en una planta de potabilización de agua ubicada en el sector PEQUIVEN de Aguas Industriales del Complejo Criogénico de Jose, estado Anzoátegui. Este material se adquiere en el mercado sin impurezas, por lo que no se hizo necesaria su preparación. Sin embargo, el mismo se sometió a un proceso de secado en un horno marca Boekel Industries Inc., modelo 107905, a una temperatura de 150 °C, durante un período de 72 horas, ya que en el ensayo de granulometría se requiere que el material se encuentre totalmente libre de humedad. La determinación de la granulometría de la microarena se llevó a cabo utilizando el procedimiento estandarizado ASTM (2000), designación D 422-63. Este procedimiento permitió el diseño de una microarena con una granulometría específica y su separación en diferentes tamaños, tal como se muestra en la tabla 1. El tamaño efectivo resultante fue de 0,09 mm con un coeficiente de uniformidad de 2,6; lo que significa que el material es fino y bastante uniforme.

Tabla 1. Granulometría de la microarena utilizada como agente lastrante.

Tamices	Rango de tamaño del grano retenido mm	Diámetro promedio mm	% Retenido
# 30	0,600-0,850	0,725	0,00
# 35	0,500-0,600	0,550	0,00
# 40	0,425-0,500	0,463	0,02
# 50	0,300-0,425	0,363	0,02
# 60	0,250-0,300	0,275	8,15
# 80	0,180-0,250	0,215	49,8
# 100	0,150-0,180	0,165	6,37
# 120	0,125-0,150	0,138	11,98
# 140	0,106-0,125	0,116	6,38
# 200	0,075-0,106	0,091	8,34
FONDO	-----	-----	8,94

Preparación de los flóculos

El procedimiento utilizado para la preparación de los flóculos fue igual al establecido en otras investigaciones (Ghanem 2002, Young y Edwards 2003, Ghanem *et*

al. 2007), de acuerdo a los siguientes parámetros: a) un agua de ensayo que contenía un volumen de 500 mL de solución, preparada con agua destilada y 1g/L de bicarbonato de sodio (NaHCO_3 , marca Industrias Químicas Erba C.A.), el cual fue utilizado

para suministrarle alcalinidad al agua y para mantener un pH alrededor de 7; b) una dosis de coagulante de 250 mg/L de cloruro de Fe (III) ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, marca Industrias Químicas Erba C.A) o de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$, marca Merck); c) una dosis de polímero aniónico de 5 mg/L como ayudante de la floculación (marca Polyfloc® AE1123 BetzDearborn); d) una dosis de microarena (M) como agente lastrante para la formación de flóculos lastrados, variable desde 1 g/L hasta 4 g/L y utilizando diferentes tamaños de granos de 0,275 mm; 0,215 mm; 0,165 mm; 0,138 mm y 0,116 mm. Las dosis empleadas de la microarena, se basaron en las utilizadas comúnmente en las plantas de tratamiento que emplean el proceso de floculación lastrada. A los flóculos químicos se les asignó una dosis de 0 g/L de microarena. La temperatura del fluido en los ensayos fue de 25 ± 2 °C. Para facilitar la dosificación de los coagulantes y ayudantes de la coagulación durante la formación de los flóculos, se prepararon tres soluciones madre de concentraciones 50 g/L de FeCl_3 , 25 g/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y 1 g/L para el polímero aniónico. Cada solución fue preparada en matraces aforados de 500 mL de capacidad utilizando agua destilada. Una vez preparadas las soluciones madre se almacenaron en envases de vidrio con tapas.

Las pruebas de jarras se realizaron para diferentes combinaciones de coagulantes, tamaños y concentraciones del agente lastrante. En las mismas se tomó como referencia el protocolo recomendado en el ensayo estandarizado ASTM (1999), designación D 2035 – 50, y se utilizó el procedimiento descrito en investigaciones previas (Ghanem 2002, Young y Edwards 2003), tal como se indica a continuación: se prepararon los flóculos utilizando un agitador eléctrico marca VWR, modelo F10A 250 V, sobre el cual se colocó un vaso de precipitado conteniendo 500 mL del agua de ensayo. Se introdujo una barra magnética de 3 cm de longitud, marca Spinbar y luego se puso en funcionamiento el agitador a una velocidad de 800 rpm para lograr una mezcla rápida. Después de un minuto de mezcla, se añadió el coagulante cloruro de Fe (III) o sulfato de aluminio y se dejó transcurrir un minuto de mezclado a la misma velocidad seguido de la adición del polímero, el cual se mezcló durante 10 s. Para la formación de los flóculos lastrados, después de 10 s de la adición del polímero, se añadió el agente lastrante con una granulometría y dosificación específica y se mezcló durante 10 s adicionales. Luego la velocidad se redujo a 400 rpm para lograr una mezcla lenta y permitir la floculación durante un lapso de 2 min. La suspensión permaneció agitándose durante un periodo máximo de

6 min para la obtención de las muestras de flóculos. Después de ese tiempo se preparó una suspensión nueva y así sucesivamente hasta realizar la serie de experimentos establecidos.

Pruebas de sedimentación libre

Debido a su simplicidad y bajo costo, estas pruebas son un método ampliamente utilizado en la literatura para medir la velocidad de sedimentación de un flóculo y su diámetro, cuando éste sedimenta por gravedad a través de un fluido en reposo en una columna de sedimentación. Se realizaron 853 ensayos para los flóculos preparados con cloruro de Fe (III) y 762 para los flóculos preparados con sulfato de aluminio. El procedimiento a seguir se basó en investigaciones previas (Tambo y Watanabe 1979, Li y Ganczarczyk 1987, Huang 1993, Lee *et al.* 1996; Adachi y Tanaka 1997, Johnson *et al.* 1996, Ghanem 2002). Se utilizó una columna de sedimentación (Figura 1), la cual consistió de un tubo construido en vidrio de 3 mm de espesor y sección transversal cuadrada de 4 cm x 4 cm y 50 cm de longitud, a la cual se fijó, al borde de su pared frontal, una cinta métrica con graduaciones verticales cada 1 cm y apreciación de 0,10 cm. Las medidas transversales de la columna fueron establecidas para minimizar el efecto de las paredes sobre la velocidad de sedimentación de los flóculos, las cuales fueron aproximadamente 20 veces el promedio del diámetro de los flóculos. La columna fue fijada en una posición vertical, utilizando un soporte de madera y sosteniéndola con una pinza y un soporte universal, sobre una mesa colocada contra una pared. A continuación, se colocó al frente de la columna una cámara digital marca HP, modelo Photosmart R 707 y resolución 5 MP, sostenida y fijada a un trípode, con el fin de registrar el diámetro del flóculo a través de una fotografía, ubicando un punto específico en la columna de sedimentación con la cámara. La columna fue iluminada lateralmente con una lámpara de halógeno de 100 W y colocada perpendicularmente a la dirección donde fue puesta la cámara. Adyacente a la lámpara, se colocó un flash para mejorar la imagen del flóculo durante el momento en que fuera tomada la fotografía. Para mejorar el contraste de las fotografías, en la parte posterior de la columna se colocó en la pared una cartulina blanca para el ensayo con los flóculos de cloruro de Fe (III) y una de color negro para los flóculos de sulfato de aluminio. Una vez montado el equipo a utilizar para la prueba de sedimentación, se llenó la columna con agua destilada hasta un nivel de aproximadamente 5 cm por debajo del borde para evitar derrames. Luego se procedió a la preparación de los flóculos tal como se describió previamente en la prueba

de jarras. Durante el período de 6 min de mezclado lento, en la prueba de jarras, se tomaron las muestras de los flocúlos del vaso de precipitados aproximadamente a una profundidad 5 cm por debajo de la superficie del agua, pero no en el remolino, usando una pipeta plástica de abertura 5 mm para evitar la ruptura de los flocúlos.

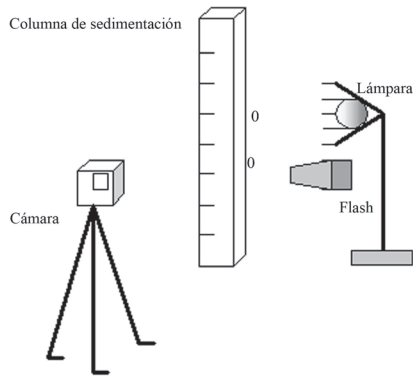


Figura 1. Diagrama esquemático del aparato de columna utilizado en las pruebas de sedimentación libre.

La muestra de un flocúlo fue colocada cuidadosamente en la superficie del agua de la columna para mantener la estaticidad del líquido. Basado en experiencias previas y para asegurar que el flocúlo alcanzara su velocidad terminal, se permitió que éste sedimentara a una distancia de 30 cm por debajo del punto de colocación (Huang 1993, Johnson *et al.* 1996, Ghanem 2002). Esta velocidad se determinó midiendo con un cronómetro marca Sportline, el tiempo de caída del flocúlo en el momento en que éste pasara por el intervalo comprendido entre 30 y 40 cm, lo cual correspondió a una distancia de 10 cm. Simultáneamente, en este mismo intervalo, se tomó la fotografía del flocúlo correspondiente, con una apertura de cámara de F2.8 y una velocidad de obturación de 1/400 s. La exactitud de las medidas obtenidas de las fotos, así como también los factores de corrección de las mismas se comprobaron utilizando unas esferas sólidas de poliestireno de 3 mm de diámetro y 1,05 g/cm³ de densidad, marca Polysciences, Inc. A estas esferas, empleadas para calibrar el aparato y como control de los resultados experimentales, se les aplicó el mismo procedimiento experimental de los flocúlos en la columna de sedimentación. Antes de comenzar con el ensayo siguiente, la columna fue lavada tres veces y luego llenada nuevamente con agua destilada para garantizar la pureza de este fluido durante el proceso de sedimentación. Una vez

obtenidas las fotografías, el diámetro de cada flocúlo fue medido en dos ejes: en el sentido normal a la dirección del flujo (d_N) y en el sentido longitudinal a la dirección del flujo (d_L), según se muestra en la Figura 2.

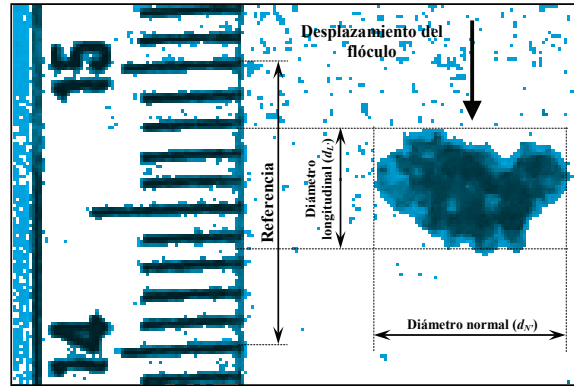


Figura 2. Dimensiones de un flocúlo de cloruro de Fe (III) medidas de una fotografía tomada en una columna de sedimentación.

Este diámetro se corrigió utilizando la siguiente expresión, sugerida por Tambo y Watanabe (1979):

$$d_M = \frac{1}{A_1 A_2} d_{PH} \quad (1)$$

Donde d_M = diámetro medido corregido del flocúlo: d_N ó d_L (mm); $1/A_1 A_2$ = factor de corrección por fotografía (adimensional); A_1 = factor de agrandamiento debido a la impresión de la fotografía (adimensional), el cual se obtuvo con la medida de la cinta métrica colocada en la columna; A_2 = factor de agrandamiento debido a la proyección del agua y del vidrio en la columna (adimensional), el cual se obtuvo con las esferas de poliestireno; d_{PH} = diámetro aparente del flocúlo, medido directamente de la fotografía: d_N' ó d_L' (mm).

Después de efectuar la corrección de cada una de las dimensiones d_N' y d_L' , según la Ecuación. 1, se obtuvieron los valores medidos corregidos d_N y d_L , los cuales se promediaron para obtener el diámetro definitivo de cada flocúlo (d), que fue utilizado en todos los cálculos posteriores para la velocidad de sedimentación (un criterio similar fue aplicado por Huang (1993). El valor medido de la velocidad de sedimentación, en m/s, se calculó según lo siguiente:

$$v_s' = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Donde L = longitud de recorrido del flóculo en la columna de sedimentación entre dos niveles predeterminados debajo de la superficie del agua (m); t = tiempo de viaje correspondiente a L (s). Para esta investigación, el valor de L se fijó en 10 cm. La velocidad v_s fue utilizada para calcular el número de Reynolds (Re') del flóculo, según la siguiente ecuación:

$$Re' = \frac{\rho v_s d}{\mu} \quad (3)$$

Donde Re' = número de Reynolds (adimensional); d = diámetro definitivo del flóculo después de promediar los valores medidos corregidos (m) y μ = viscosidad absoluta del agua (Pa-s ó kg/m-s). Con este valor de Re' como referencia, se corrigió por efectos de pared, la velocidad obtenida según la Ecuación 2. Para ello se utilizó un factor de corrección obtenido de la Ecuación 4 cuando $Re' < 1.0$ (régimen laminar) ó de la Ecuación 5 cuando $Re' > 1.0$ (régimen de transición o turbulento), de acuerdo a lo siguiente (Brown *et al.* 1950):

$$C_F = \left(1 - \frac{d}{D_C}\right)^{2.25} \quad (4)$$

$$C_F = \left[1 - \left(\frac{d}{D_C}\right)^{1.5}\right] \quad (5)$$

Donde C_F = factor de corrección (adimensional); d = diámetro definitivo del flóculo después de promediar los valores medidos corregidos (m) y D_C = diámetro de la columna (m). Los valores referenciales para Re' en las Ecuaciones 4 y 5, han sido recomendados por varios autores (e.g., Brown *et al.* 1950, Lee *et al.* 1996, Gregory *et al.* 1999).

Se determinó la velocidad de sedimentación definitiva considerando el efecto de pared con la siguiente ecuación:

$$v_s = \frac{v_s'}{C_F} \quad (6)$$

Procesamiento y análisis estadístico de los resultados

Una vez finalizados todos los ensayos se procedió

a la selección de los resultados mediante un análisis estadístico. De los valores experimentales obtenidos se descartaron aquellos que no cumplieran con las siguientes condiciones:

a) los tiempos de viaje de cada flóculo, medidos en la columna de sedimentación, deben estar comprendidos entre el siguiente rango de valores:

$$t = \bar{X}_t \pm 2\sigma_t \quad (7)$$

Donde: \bar{X}_t = media aritmética del tiempo de viaje t y σ_t = desviación estándar de t

b) la velocidad de sedimentación de cada flóculo, calculada mediante la Ecuación 6, debe estar comprendida entre el siguiente rango de valores:

$$v_s = \bar{X}_{v_s} \pm 2\sigma_{v_s} \quad (8)$$

Donde: \bar{X}_{v_s} = media aritmética de la velocidad de sedimentación v_s que pertenece a un rango de valores correspondiente a una característica determinada (e.g., un valor de M y un diámetro de microarena) y σ_{v_s} = desviación estándar de v_s . Los valores de v_s seleccionados según los criterios anteriores, se platearon en función de M para los diferentes tipos y tamaños de microarena. Las relaciones matemáticas obtenidas de esos resultados fueron calculadas realizando un análisis de correlación, para cada caso en particular. Para el análisis de los resultados se utilizaron hojas de cálculo Microsoft Office Excel 2003.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Velocidad de Sedimentación de los Flóculos Químicos

En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en el laboratorio, de la velocidad de sedimentación para flóculos químicos de cloruro de Fe (III). Tal como se observa en la tabla, para estos flóculos se obtuvo una velocidad de promedio de 27,82 m/h, con una desviación estándar de 3,09 m/h y un rango comprendido entre 22,66 y 34,54 m/h. Análogamente, se obtuvo un valor promedio de la velocidad de sedimentación para flóculos químicos de sulfato de aluminio de 39,92 m/h, con una desviación estándar de 3,99 m/h y un rango comprendido entre 33,24 y 47,43 m/h.

Tabla 2. Algunos de resultados las pruebas de sedimentación libre para floculos químicos de cloruro de Fe (III)

Fecha	Foto #	M (g/l)	d_N' (mm)	d_L' (mm)	t (s)	L (cm)	$1/A_1A_2$	d_N (mm)	d_L (mm)	d (mm)	v_s' (m/s)	Re' (-)	C_F (-)	v_s (m/h)
15/05/2006	3	0	9,00	6,50	14,34	10	0,517008	4,65	3,36	4,01	0,007	31,30	0,97	25,927
	4	0	8,00	5,50	14,59	10	0,504083	4,03	2,77	3,40	0,007	26,13	0,98	25,302
	5	0	7,50	6,00	14,84	10	0,517008	3,88	3,10	3,49	0,007	26,34	0,97	24,900
	6	0	10,00	6,00	14,05	10	0,517008	5,17	3,10	4,14	0,007	32,98	0,97	26,504
	7	0	11,00	7,50	12,05	10	0,517008	5,69	3,88	4,78	0,008	44,46	0,96	31,164
	8	0	8,00	5,00	15,45	10	0,517008	4,14	2,59	3,36	0,006	24,37	0,98	23,883
	9	0	17,00	10,00	13,65	10	0,517008	8,79	5,17	6,98	0,007	57,28	0,93	28,447
	10	0	13,50	8,00	13,65	10	0,517008	6,98	4,14	5,56	0,007	45,61	0,95	27,814
	11	0	11,00	6,00	14,25	10	0,517008	5,69	3,10	4,39	0,007	34,55	0,96	26,218
	12	0	14,00	8,00	11,45	10	0,517008	7,24	4,14	5,69	0,009	55,64	0,95	33,222
	13	0	10,00	9,50	14,97	10	0,517008	5,17	4,91	5,04	0,007	37,72	0,96	25,174
	14	0	9,00	7,00	11,89	10	0,517008	4,65	3,62	4,14	0,008	38,97	0,97	31,319
	15	0	10,00	8,00	14,53	10	0,517008	5,17	4,14	4,65	0,007	35,88	0,96	25,800
	16	0	9,50	7,00	11,98	10	0,517008	4,91	3,62	4,27	0,008	39,89	0,97	31,134
	17	0	9,50	4,50	15,00	10	0,517008	4,91	2,33	3,62	0,007	27,03	0,97	24,671
	18	0	7,50	7,00	12,60	10	0,517008	3,88	3,62	3,75	0,008	33,33	0,97	29,415
	19	0	12,50	8,00	12,39	10	0,517008	6,46	4,14	5,30	0,008	47,92	0,95	30,528
	21	0	6,50	5,00	14,50	10	0,517008	3,36	2,59	2,97	0,007	22,97	0,98	25,341
	22	0	15,00	18,50	11,59	10	0,517008	7,76	9,56	8,66	0,009	83,71	0,90	34,541
	23	0	9,00	7,00	13,10	10	0,517008	4,65	3,62	4,14	0,008	35,37	0,97	28,426
	24	0	10,00	7,50	11,35	10	0,517008	5,17	3,88	4,52	0,009	44,65	0,96	32,972
	25	0	8,00	8,00	14,81	10	0,517008	4,14	4,14	4,14	0,007	31,29	0,97	25,144
	26	0	12,00	7,00	14,90	10	0,517008	6,20	3,62	4,91	0,007	36,93	0,96	25,247
	29	0	11,00	7,50	12,38	10	0,517008	5,69	3,88	4,78	0,008	43,28	0,96	30,333
	30	0	8,50	8,00	13,53	10	0,517008	4,39	4,14	4,27	0,007	35,32	0,97	27,567
	31	0	10,00	7,50	11,72	10	0,517008	5,17	3,88	4,52	0,009	43,24	0,96	31,931
	32	0	15,50	5,50	14,75	10	0,517008	8,01	2,84	5,43	0,007	41,23	0,95	25,691
	34	0	7,50	5,50	14,40	10	0,517008	3,88	2,84	3,36	0,007	26,14	0,98	25,624
	35	0	8,00	5,00	16,28	10	0,517008	4,14	2,59	3,36	0,006	23,13	0,98	22,665
	36	0	7,00	5,00	13,75	10	0,504083	3,53	2,52	3,02	0,007	24,64	0,98	26,738
	37	0	9,00	6,00	14,16	10	0,517008	4,65	3,10	3,88	0,007	30,68	0,97	26,215
	39	0	10,00	8,00	12,28	10	0,517008	5,17	4,14	4,65	0,008	42,45	0,96	30,527

Continuación de la Tabla 2.

Propiedades del Agua @ 25 ± 2 oC			Análisis Estadístico de los Resultados			
μ (kg/m-s)	ρ (kg/m ³)	D_C (m)	\bar{X} vS (m/h)	σ vS (m/h)	vS + 2 σ vS	\bar{X} vS - 2 σ vS
0,000890	997,048	0,04	27,82	3,09	34,00	21,65

Comportamiento de la Velocidad de Sedimentación de los Flóculos Lastrados en Función de la Dosis del Agente Lastrante

En las figuras 3 y 4 se representa la variación de las velocidades de sedimentación promedio de los flóculos en función de la dosis del agente lastrante, obtenidas tanto para el cloruro de Fe (III) como para el sulfato de aluminio, respectivamente. Para ambos casos, se observó un aumento progresivo y lineal de la velocidad de los flóculos a medida que aumenta la dosis de microarena (M), por lo que sus resultados fueron ajustados a ecuaciones lineales. También se observó un comportamiento similar entre las rectas obtenidas, para cada uno de los diámetros de microarena. Para el cloruro de Fe (III) (figura 3) se encontraron correlaciones de 1,00; 0,96; 0,93; 0,88 y 0,91. Es de notar que el valor de las pendientes de las rectas se encuentra comprendido entre 46,85 y 49,76 y que la intersección con el eje de las abscisas, corresponde a la velocidad de sedimentación de los flóculos químicos obtenida en el laboratorio (27,82 m/h). El rango de velocidades para los flóculos lastrados estuvo comprendido entre 75,94 m/h y 218,43 m/h. Los valores promedio fueron 96,79 m/h; 143,19 m/h; 173,04 m/h y 209,39 m/h para las dosis de 1 g/L, 2 g/L, 3 g/L y 4 g/L, respectivamente. Para el sulfato de aluminio (figura 4), las correlaciones obtenidas fueron de 0,92; 0,92; 0,99; 0,99 y 0,95. Las pendientes de las líneas rectas están comprendidas entre 59,48 y 70,32, donde el punto de intersección con el eje de las abscisas, corresponde al valor experimental promedio de 39,92 m/h para $M = 0$ g/L. El rango de velocidades para los flóculos lastrados estuvo comprendido entre 115,78 m/h y 306,76 m/h. Los valores promedio fueron 129,23 m/h; 190,26 m/h; 238,15 m/h y

289,40 m/h para las dosis de 1 g/L, 2 g/L, 3 g/L y 4 g/L, respectivamente. La forma lineal de las ecuaciones obtenidas anteriormente también fue encontrada por Ghanem (2002), sin embargo las constantes obtenidas en sus experimentos, no fueron similares a las del presente trabajo. Esto es debido a que las microarenas utilizadas en ambas investigaciones poseen características diferentes. Cabe destacar que en el trabajo de Ghanem solo se utilizó cloruro de Fe (III) como coagulante.

Es importante señalar que en las figuras 3 y 4, algunos de los resultados experimentales muestran un comportamiento que podría ser representado mediante una relación no lineal del tipo: $v_s = k_1(1 - e^{-k_2 M})$, donde k_1 y k_2 serían constantes en las cuales k_1 representaría la velocidad de sedimentación máxima que se pudiera alcanzar para una dosis máxima de microarena. En la práctica, los valores de M típicos varían entre 2 y 4 g/L (Desjardins *et al.* 2002). Se ha observado que para dosis de microarena mayores o iguales a 7 g/L, los flóculos comienzan a romperse debido al alto contenido de agente lastrante (Desjardins *et al.* 2002, Ghanem *et al.* 2007). En el presente trabajo, este comportamiento fue observado durante la preparación de los flóculos cuando se trataron de aplicar dosis mayores de 4 g/L. Generalmente, esta dosis es el límite máximo más común en las plantas de tratamiento que utilizan el proceso de floculación lastrada. Aunque esta última relación, posiblemente describa mejor el comportamiento de la velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados en función del agente lastrante, la ecuación lineal propuesta mostró una buena correlación para valores de $M < 4$ g/L, además de que representa una forma más simple de simular su comportamiento.

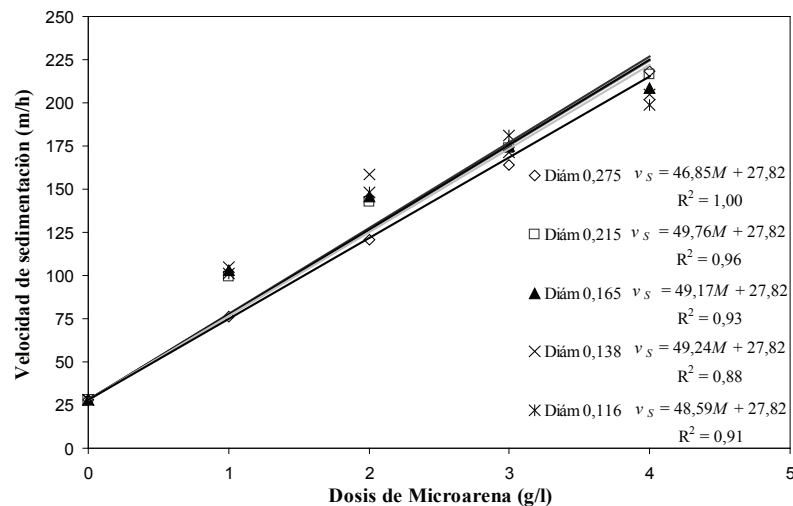


Figura 3. Velocidad de sedimentación de los flóculos de cloruro de Fe (III) en función de la dosis de agente lastrante.

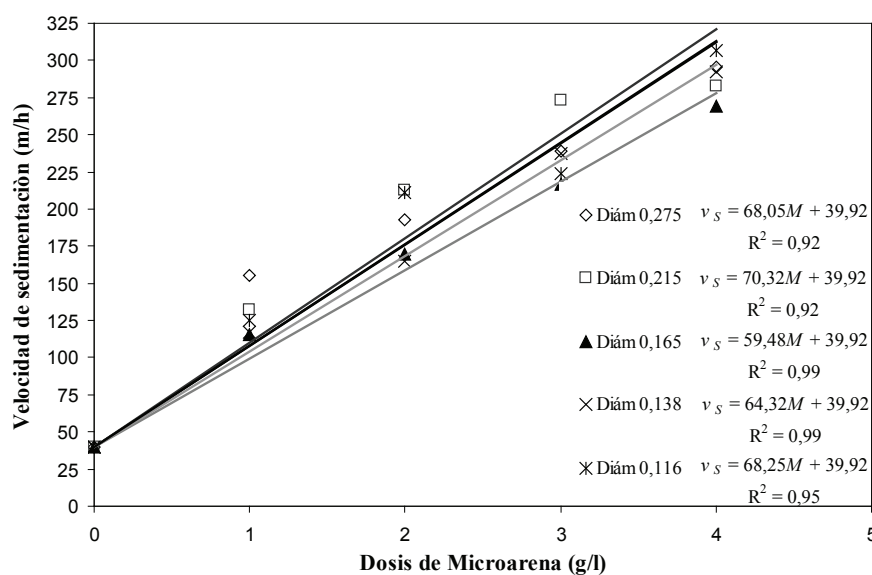


Figura 4. Velocidad de sedimentación de los flóculos de sulfato de aluminio en función de la dosis de agente lastrante.

Velocidad de Sedimentación de los Flóculos Lastrados en Función del Tamaño de los Granos del Agente Lastrante

Las figuras 5 y 6 representan las gráficas de la velocidad promedio de sedimentación de los flóculos en función del tamaño de los granos (diámetro) de la microarena, para el cloruro de Fe (III) y para el sulfato de aluminio respectivamente. Para el cloruro de Fe (III) (figura 5), no se observa un comportamiento definido entre las curvas. Las mayores velocidades en las dosis de 1 g/L y 2 g/L se observaron para el tamaño de grano 0,138 mm, con valores de 104,81 m/h y 158,60 m/h respectivamente; en la dosis de 3 g/L la mayor velocidad fue para el tamaño 0,116 mm (181,19 m/h) y en la dosis de 4 g/L fue para el tamaño 0,275 mm (218,43 m/h). Para el sulfato de aluminio (figura 6), al igual que para el cloruro de Fe (III), no se observó un comportamiento definido entre las curvas. La mayor velocidad en la dosis de 1 g/L fue de 155,63 m/h para el tamaño 0,275 mm; para las dosis de 2 g/L y 3 g/L se observaron valores de 212,76 m/h y 273,33 m/h para el tamaño 0,215 mm, respectivamente; en la dosis de 4 g/L fue de 306,76 m/h para 0,116 mm. Las relaciones obtenidas anteriormente no necesariamente definen en forma general el comportamiento de la velocidad de sedimentación en función del diámetro del agente lastrante, debido a que pueden ser solo válidas para este caso en particular. Tal es el caso de Cailleaux *et al.* (1992), que encontraron en su investigación que para una dosis de 1,5 g/L de microarena utilizada como agente

lastrante, la velocidad de sedimentación se relacionaba con el tamaño del mismo en forma proporcional y mediante una distribución uniforme para granos menores de 0,160 mm. Sin embargo, para granos mayores de 0,160 mm hasta 0,400 mm, existía una distribución heterogénea de velocidades de sedimentación en los flóculos lastrados, con valores que oscilaban aproximadamente entre un mínimo de 6 m/h y un máximo de 160 m/h. Por lo tanto, es recomendable realizar otras investigaciones al respecto antes de obtener una conclusión general y definitiva.

Con base en los resultados anteriores se puede inferir que el diámetro del agente lastrante no tiene tanta influencia en la velocidad de sedimentación como lo tiene la dosis. Esto puede ser debido a que el diámetro de las partículas de microarena, no afecta tanto la densidad de los flóculos como lo puede afectar la dosis. Aunque las densidades no fueron reportadas en este trabajo, se realizó una investigación previa para determinar sus valores bajo las mismas condiciones experimentales (Paulesu y Campos 2006).

En vista que existen otros coagulantes en el mercado, como por ejemplo, el policloruro de aluminio, se recomienda analizar el comportamiento de la velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados formados con este coagulante y con otros coagulantes comerciales y comparar sus resultados con aquellos obtenidos tanto para el cloruro de Fe (III) como para el sulfato de aluminio.

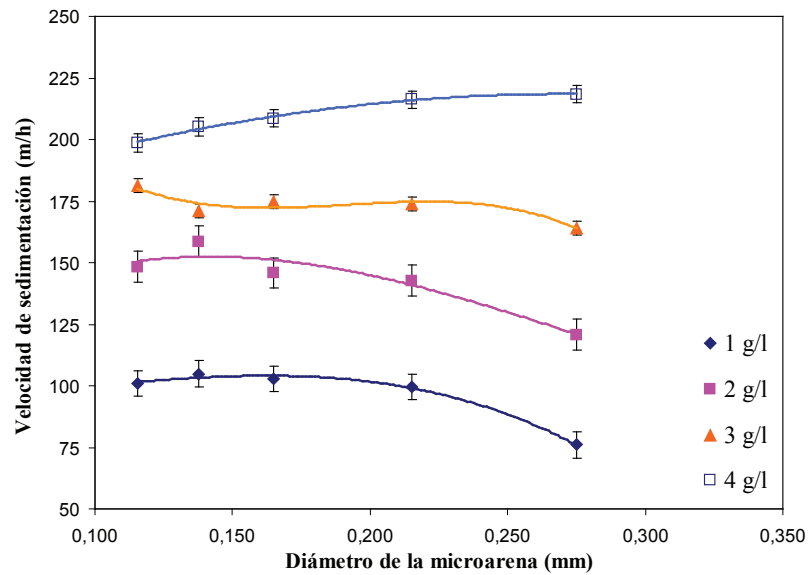


Figura 5. Velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados de cloruro de Fe (III) en función del diámetro de la microarena.

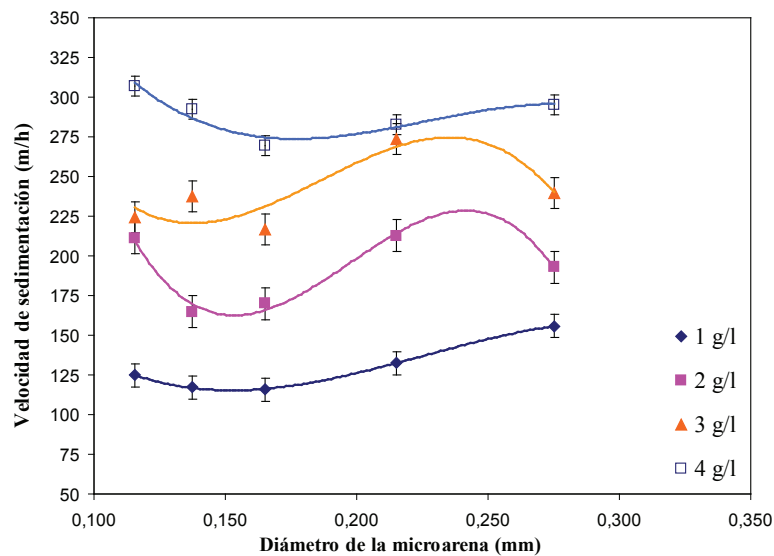


Figura 6. Velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados de sulfato de aluminio en función del diámetro de la microarena.

CONCLUSIÓN

La velocidad de los flóculos lastrados aumenta proporcionalmente y en forma lineal al aumentar la dosis del agente lastrante. Esta relación se cumple para cualquier tamaño de grano de microarena, utilizando cloruro de Fe (III) y sulfato de aluminio como coagulantes.

La velocidad de sedimentación de los flóculos lastrados, en función del tamaño de los granos de agente

lastrante, no presenta un comportamiento definido. Por lo tanto, el factor que aparentemente tiene mas influencia en la velocidad de sedimentación, es la dosis de agente lastrante.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, según el código CI-3-020701-1204/05. Los autores agradecen al

profesor Diógenes Suárez, Coordinador de la Comisión de Investigación del Núcleo de Anzoátegui, y a todo el personal que labora en esa dependencia, por su valiosa colaboración. También agradecen el gran apoyo y colaboración prestada por José Pastrana, Auxiliar Docente del Laboratorio de Suelos del Departamento de Ingeniería Civil de la UDO – Anzoátegui y a Roiman Villael, Superintendente de Operaciones de Aguas del Complejo Criogénico de Jose – Sector PEQUIVEN.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADACHI Y., TANAKA Y. 1997. Settling velocity of an aluminum - kaolinite floc. *Water Res.* 31(3): 449-454.
- ASTM STANDARDS. 1999. Section 11. Water and Environmental Technology. VOL. 11.02. WATER (II), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States, pp. 74-76.
- ASTM STANDARDS. 2000. Section 4. Construction. Vol. 04.08. Soil and Rock (I), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States, pp. 89-92.
- BROWN G., KATZ D., FOUST A., SCHNEIDEWIND R. 1950. Unit operations, John Wiley and Sons, Inc., New York, United States, pp. 72-83.
- CAILLEAUX C., POJUL E., DIANOUS F., DROUTON J. 1992. Study of weighed flocculation in view of a new type of clarifier. *Aqua.* 41(1): 18-27.
- CHANG F., GUTSHALL M., SKRADSKI R. 1998. Microsand enhanced clarification for wastewater treatment: results from pilot plant studies in primary, tertiary, and CSO applications, Proceedings of the 71st Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference, Orlando, FL, WEF, Alexandria, Va, United States.
- DESJARDINS C., KOUDJONOU B., DESJARDINS R. 2002. Laboratory study of ballasted flocculation. *Water Res.* 36 (3): 744-754.
- GHANEM A. 2002. Fundamentals of ballasted flocculation reactions. Ph.D. Thesis. Dept. of Civil Engineering, University of Arkansas, United States, 164 pp.
- GHANEM A., YOUNG J., EDWARDS F. 2007. Mechanisms of ballasted floc formation. *J. Environ. Eng. ASCE.* 133(3): 271-277.
- GREGORY R., ZABEL T., EDZWALD J. 1999. Sedimentation and flotation. *Water quality & treatment*, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 7.1-7.87.
- HUANG H. 1993. Porosity-size relationship of drilling mud flocs: fractal structure. *Clay Clay Miner.* 41(3): 373-379.
- JIANG Q., LOGAN B. 1991. Fractal dimensions of aggregates determined from steady-state size distributions. *Environ. Sci. Technol.* 25(12): 2031-2038.
- JOHNSON C., LI X., LOGAN B. 1996. Settling velocities of fractal aggregates. *Environ. Sci. Technol.* 30(6): 1911-1918.
- LEE D., CHEN G., LIAO Y., HSIEH C. 1996. On the free-settling test for estimating activated sludge floc density. *Water Res.* 30(3): 541-550.
- LI D., GANCZARZYK J. 1987. Stroboscopic determination of settling velocity, size, and porosity of activated sludge flocs. *Water Res.* 21(3): 257-262.
- PAULESU G., CAMPOS, F 2006. Comportamiento de la velocidad de sedimentación para diferentes diámetros de microarenas en flóculos lastrados. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Barcelona, Venezuela.
- TAMBO N., WATANABE Y. 1979. Physical characteristics of flocs - I. The floc density function and aluminum floc. *Water Res.* 13(5): 409-419.
- WU R., LEE D. 1998. Hydrodynamic drag force exerted on a moving floc and its implication to free - settling tests. *Water Res.* 32(3): 760-768.
- YOUNG J., EDWARDS F. 2003. Factors affecting ballasted flocculation reactions. *Water Environ. Res.* 75(3): 263-272.