

SEDIMENTACION DISCONTINUA EN SEDIMENTADORES INCLINADOS

R. LAMA-RAMIREZ. *, C. CONDORHUAMÁN-CCORIMANYA

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS - FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
 Departamento Académico de Operaciones Unitarias
 Av. Venezuela cdra. 34 s/n, LIMA - PERU

Abstract : The discontinuous sedimentation of water suspensions of various solids with specific gravity in the range of 2.7 y 9.2 has been studied in inclined settlers of circular and rectangular cross sectional area. The inclination angle, with regard to the horizontal fluctuates between 35° and 75° for suspensions that vary in concentration between 39,4 and 1070 g/l. The apparent rates of settling are in the range of 0.071 and 17.6 cm/min. The calculation has been correlated using a modified version of the Nakamura and Kuroda equation [1].

Key words : Sedimentation of water suspensions, inclined settlers, discontinuous settlers, solid - liquid separation.

$$S' = S \left[1 + 0.53 \left[\frac{H_0}{B} \right] \times [\cos(\beta)] \right]$$

Resumen : Se ha estudiado la sedimentación discontinua de suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado, de sulfato de bario, y de óxido de plomo en sedimentadores inclinados de sección transversal circular y rectangular. El ángulo de inclinación, con respecto a la horizontal, fluctúa entre 35° y 75°, para suspensiones que varían en concentración entre 39,4 y 1070 g/l. Las velocidades aparentes de sedimentación obtenidas fluctúan entre 0,071 y 17,6 cm/min. La velocidad aparente de sedimentación se ha correlacionado usando una versión modificada de la ecuación de Nakamura y Kuroda [1], ver arriba.

Palabras clave : Sedimentación de suspensiones acuosas, sedimentadores inclinados, separaciones sólido - líquido.

INTRODUCCIÓN

La sedimentación[2-7] es utilizada en los procesos de separación de sólidos de una suspensión sólida-líquida, cuyo mecanismo es generalmente poco conocido, observándose que muchas suspensiones son inestables y dan lugar a separaciones espontáneas en tiempos relativamente pequeños. La sedimentación de suspensiones se estudia con el objeto de aplicar un análisis y obtener una ecuación que permita predecir la velocidad de descenso de las partículas en la suspensión. En los últimos 50 años se da relativamente mayor atención a la sedimentación de suspensiones en sedimentadores inclinados por su importancia en el campo industrial.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Boycott [9] es el primer investigador que reporta sus observaciones en la sedimentación de suspensiones de sólidos en líquidos, anotando que los sólidos sedimentan más rápidamente en ductos inclinados que en ductos verticales. Nakamura y Kuroda [1] suponen que el incremento aparente de la velocidad de sedimentación se debe al descenso de las partículas

sólidas a lo largo de la "cara" inclinada; produciendo una gradiente de densidad a través de la distancia que separa las caras inclinadas del sedimentador, dando lugar al establecimiento de una corriente de convección que transporta más rápidamente a las partículas al fondo de la columna. La porción del líquido clarificado se suma a la que se produce por razón de la sedimentación de las partículas sólidas debajo de la interfase horizontal entre el líquido y el aire. Estos investigadores proponen una expresión que permite calcular la altura de la interfase en sedimentares de sección transversal rectangulares inclinados, tal como sigue:

$$H = \{H_0 + B \operatorname{cosec}(\alpha)\} \left\{ 1 + e^{-\left(\frac{S'}{B}\right) \operatorname{Sen}(\alpha)} \right\} \quad (1)$$

Diferenciando la ecuación (1) con respecto al tiempo, para $t=0$, se obtiene una expresión para la velocidad aparente de descenso de la interfase en un sedimentador de sección transversal rectangular.

$$- \frac{dH}{dt} = S' = S \left\{ 1 + \left(\frac{H_0}{B} \right) \operatorname{Sen}(\alpha) \right\} \quad (2)$$

* E-mail: d160041@unmsm.edu.pe

La ecuación (2) se modifica cuando el ángulo de inclinación esta referido a la horizontal, como sigue:

$$S' = S \left\{ 1 + \left(\frac{H_0}{B} \right) \cos(\beta) \right\} \quad (3)$$

donde: B es igual a $\pi D/4$ cuando la sección transversal del sedimentador es circular.

Kinosita [10], Inouye[11], Pearce[12] y Graham y Lama[13] calculan las velocidades aparentes de sedimentación usando la ecuación de Nakamura-Kuroda y las comparan con las obtenidas experimentalmente, encontrando que los resultados experimentales no concuerdan con los valores calculados.

Graham y Lama explican que existe una diferencia de concentración de sólidos entre las caras superior e inferior del sedimentador y proponen la siguiente ecuación:

$$S' = F_G S \left\{ 1 + \left(\frac{H_0}{B} \right) \cos(\beta) \right\} \quad (4)$$

donde F_G es un factor de corrección que depende de la fracción de sólidos en la suspensión y no varía con el ángulo de inclinación β entre 30° y 70° .

Ghosh[14, 16] y colaboradores proponen una ecuación cuya expresión final es:

$$S' = S \left\{ 1 + K \left(\frac{H_0}{B} \right) \cos(\beta) \right\} \quad (5)$$

donde K es una constante que se debe evaluar a partir de datos experimentales.

Lama[15] presenta valores de K obtenidos en la sedimentación acuosa de carbonato de calcio precipitado, (cuadro 1)

Ohsasa[17] y Valdyanathan[18] analizan los efectos del ángulo de inclinación, del ancho del ducto, y la altura inicial de la suspensión en un sedimentador discontinuo, concluyendo que la velocidad aparente de sedimentación es una función que depende directamente de los factores indicados. Zhavi y Rubin[19] proponen una ecuación para el descenso de

la interfase superior de una suspensión de partículas sólidas usando para el efecto un equipo experimental que consiste de un tanque vertical con planos inclinados dentro del mismo, cuya expresión es como sigue:

$$\frac{S'}{S} = 1 + \left(\frac{V_p}{S} \right) \quad (6)$$

Suponiendo que q° es el flujo promedio del líquido claro por unidad de área del plano inclinado y A' es la superficie del plano inclinado hasta la interfase del líquido claro en la suspensión, el caudal instantáneo Q_p ascendente del líquido claro en la zona de plano inclinado del sedimentador es:

$$Q_p = q^\circ A' \quad (7)$$

La velocidad dentro del plano inclinado del sedimentador se define como sigue:

$$V_p = \frac{q^\circ A'}{A} = \frac{Q_p}{A} \quad (8)$$

el valor de q° depende de las características del material sólido en la suspensión.

Shiragami y colaboradores[20] han trabajado con un equipo experimental constituido por placas paralelas inclinadas dentro de un tanque vertical. Haciendo un balance de materia diferencial dentro de los planos inclinados, para suspensiones acuosas de óxido de titanio, obtienen una expresión que predice el tiempo necesario para el descenso de una altura de la interfase en el sedimentador inclinado.

Zhang, y Acrivos(21) estudian los efectos de la viscosidad de la suspensión en la velocidad de sedimentación, y hacen una descripción cualitativa de las inestabilidades del flujo del líquido claro en el plano inclinado del sedimentador.

OBJETIVO DEL TRABAJO

Estudiar el efecto de la gravedad específica del sólido en la velocidad aparente de sedimentación.

Cuadro 1

TIPO SEDIMENTADOR	β	Área(cm ²) para $\beta=90^\circ$	K
Sección rectangular	50	653	0.54
Sección rectangular	50	77.4	0.54
Sección rectangular	20.8-75	25.3-51.6	0.60
Sección circular	20.8-75	5.1-20.3	0.60

Tabla 1: Gravedad específica de los materiales sólidos

Material	Gravedad específica
Carbonato de calcio precipitado	2.68
Sulfato de bario comercial	4.50
Óxido de plomo comercial	9.20

DETALLES EXPERIMENTALES Y PRESENTACIÓN DE DATOS

EQUIPO EXPERIMENTAL

La unidad experimental consta de: 7 tubos de vidrio pyrex de 1.5 metros de altura y con diámetros que varían entre 0,012 a 0,152 metros y dos columnas de material acrílico con secciones transversales rectangulares y dimensiones en la base de 0,0254 metros por 0,0762 metros y 0,0508 metros por 0,1016 metros y 1,2 metros de altura; una estructura metálica con dispositivo incorporado para medir el ángulo de inclinación del sedimentador y un balón de nitrógeno de 6 metros cúbicos.

MATERIALES

En el trabajo se hace uso de los siguientes materiales: carbonato de calcio, sulfato de bario y óxido de plomo de 38, 45 y 60 micrones de tamaño promedio de partícula, respectivamente.

METODOLOGIA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Los datos se obtienen a condiciones de presión y temperatura ambientales. Las suspensiones se preparan a concentraciones conocida se carga al sedimentador y se homogeniza la suspensión con nitrógeno gaseoso. Las muestras extraídas de la suspensión se pesan, evaporan el contenido de agua en una estufa a 100°C y luego se analizan. La concentración de sólidos en la suspensión se obtiene efectuando un balance de materia por componente tanto para las partículas como para el agua, mediante la ecuación:

$$C = \frac{1000\%}{100 - (\rho_p - \rho_f)\%} \rho_p \quad (9)$$

Los datos experimentales se obtienen al seguir el descenso del líquido claro en la cara inclinada en función del tiempo, las sensibilidades de los valores numéricos son $\pm 0,001$

metros y $\pm 1,0$ segundo[21-28], respectivamente. El valor de la altura de la interfase superior h se calcula al multiplicar el seno del ángulo de inclinación por el valor leído en el plano inclinado. La densidad absoluta del material sólido determinan a la temperatura de 25 °C mediante el uso de un picnómetro.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La gravedad específica del material sólido estudiado en este trabajo se muestra en la **tabla 1**.

Como se observa en esta tabla, la variación de la gravedad específica del sólido cubre un amplio rango y por lo tanto justifica la utilización de estas sustancias, todas ellas muy poco solubles en agua, a condiciones normales.

Para el análisis de los datos de la velocidad aparente de sedimentación en sedimentadores inclinados se ha usado la versión modificada de la ecuación de Nakamura y Kuroda. Se ha preferido esta expresión por la simplicidad que ofrece al definir muy clara y simplemente las variables involucradas en el modelo, y por ende, la posibilidad de usarla en el diseño de sedimentadores.

De acuerdo a la prueba estadística de Fisher para el análisis de varianzas, se establece que existe una correlación de los datos experimentales, **tablas 2-4**, de acuerdo a la ecuación (5)

Los resultados del análisis de residuales en la sedimentación de suspensiones de carbonato de calcio precipitado que se presentan en la **figura 1** muestran una distribución aleatoria de los errores residuales. Similares resultados se obtienen en la sedimentación de suspensiones de sulfato de bario y de óxido de plomo.

En las **figuras 2 a 4** se presentan los resultados obtenidos en la sedimentación del carbonato de calcio, sulfato de bario y óxido de plomo para un universo de 127, 97 y 70 corridas experimentales, respectivamente; así mismo, se muestran los intervalos de confianza para un nivel de significancia de 95 %.

Tabla 2: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de carbonato de calcio en sedimentadores inclinados.					
Variación de la fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados de la media	Valor de F calculado	Valor de F de la tabla
Debido a la regresión	1	1526.6	1526.6		
Acerca de la regresión	125	104.2	0.83	183.4	3.9
Corrector de la media	136	1630.8			

Tabla 3: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de sulfato de bario en sedimentadores inclinados.					
Variación de la fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados de la media	Valor de F calculado	Valor de F de la tabla
Debido a la regresión	1	264.5	264.5		
Acerca de la regresión	95	54.3	0.57	462.79	3.96
Corrector de la media	96	318.8			

Tabla 4: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de óxido de plomo en sedimentadores inclinados.					
Variación de la fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados de la media	Valor de F calculado	Valor de F de la tabla
Debido a la regresión	1	109.5	109.5		
Acerca de la regresión	68	54.8	0.81	135.9	3.987
Corrector de la media	69	84.7			

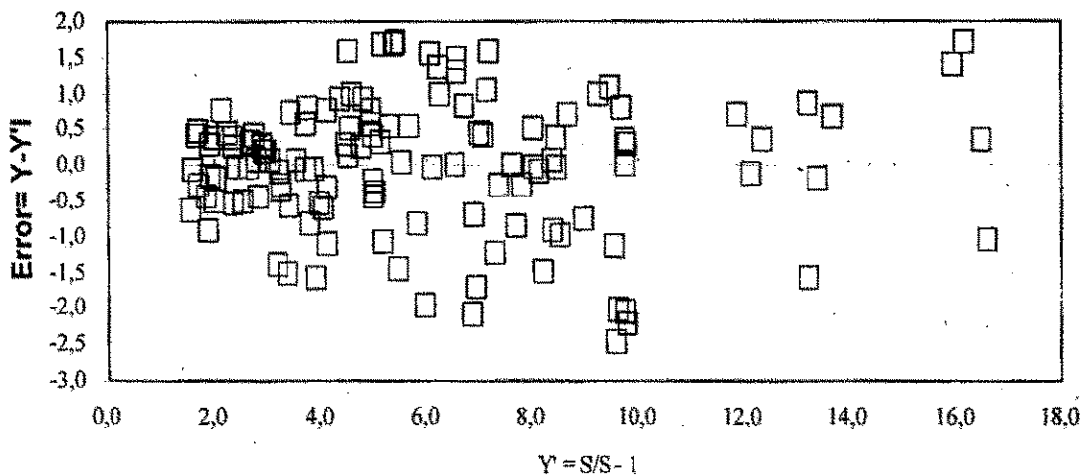


Fig. 1 : Resultados del análisis de residuales de la sedimentación de suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado en sedimentadores inclinados

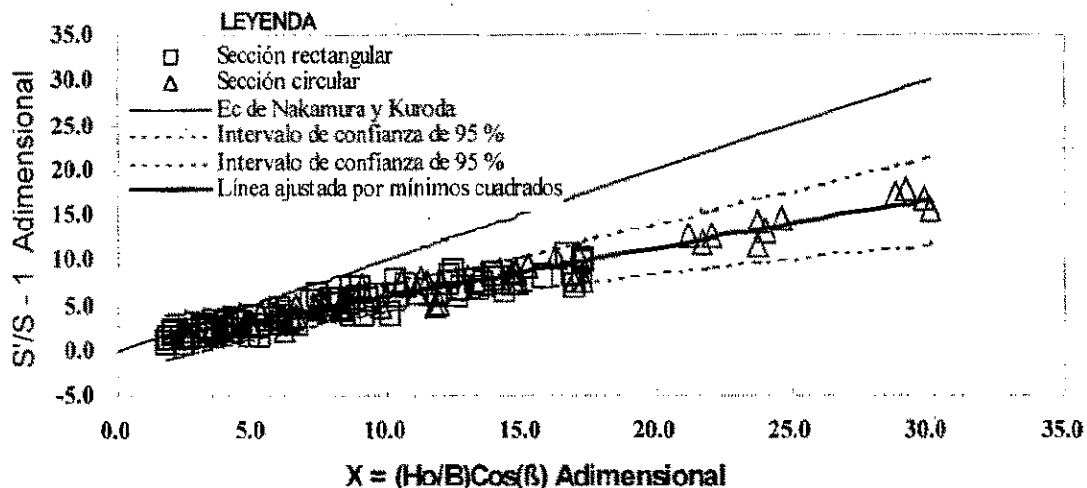


Fig. 2: Velocidad aparente de sedimentación de suspensiones acuosas de carbonato de calcio.

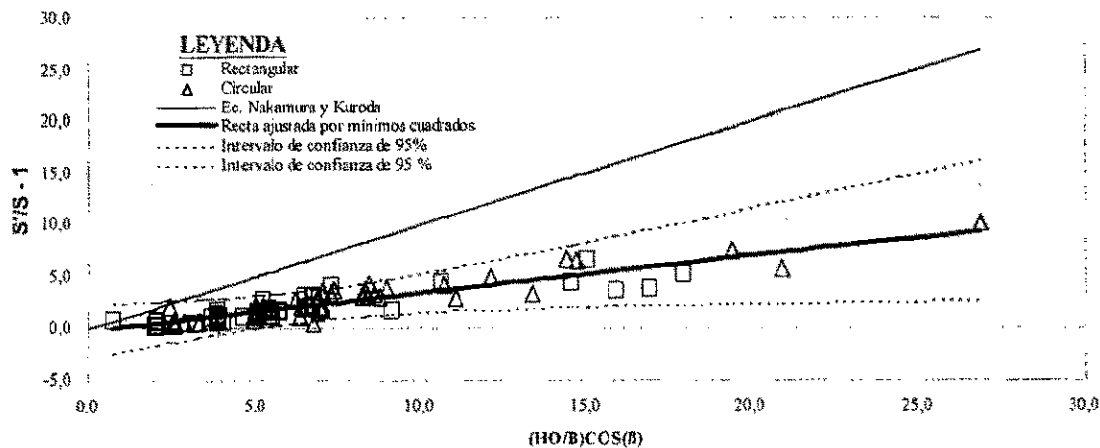


Fig. 3: Velocidad aparente de sedimentación de suspensiones acuosas de sulfato de bario.

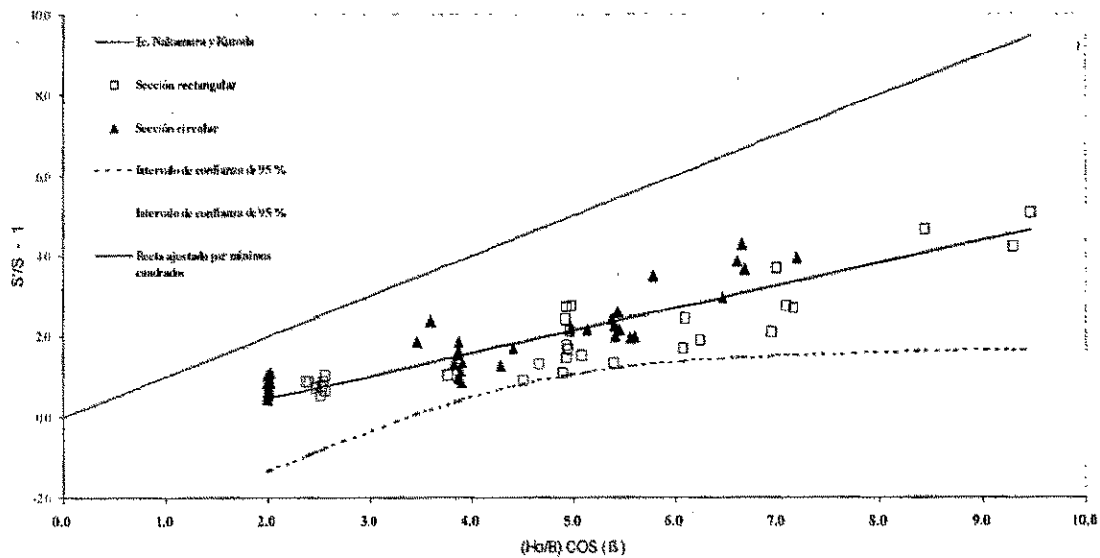


Fig. 4: Velocidad aparente de sedimentación de suspensiones acuosas de óxido de plomo.

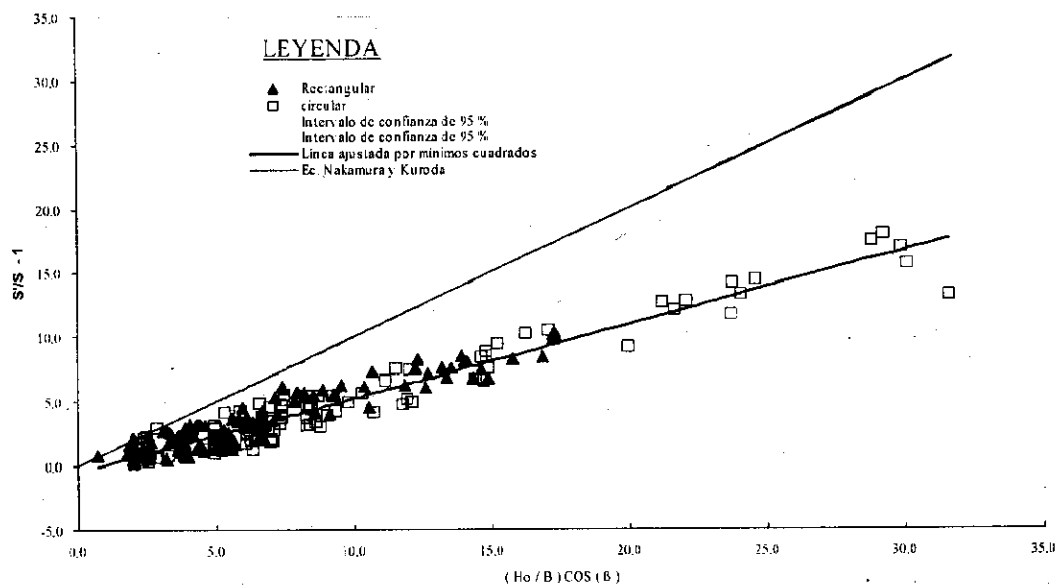


Fig. 2: Velocidad aparente de sedimentación de los tres tipos de suspensiones acuosas en sedimentadores inclinados

Tabla 5: Valores de la constante K de la ecuación 5 obtenidos aplicando el análisis de regresión a los datos experimentales de la sedimentación discontinua de varios materiales sólidos en sedimentadores inclinados.

CONSTANTE	CARBONATO CALCIO	SULFATO DE BARIO	ÓXIDO DE PLOMO
K	0,53	0,40	0,56
±ΔK	0,01	0,01	0,04

±DK es el intervalo de confianza del 95 % de nivel de significancia; en este intervalo se ubica el valor verdadero de la constante K estimado.

En la figura 5, se muestra los resultados de la sedimentación de los tres tipos de las suspensiones acuosas de los sedimentadores inclinados. La tendencia de los puntos corresponde a la forma de la ecuación 5.

En la tabla 5 se muestra el valor de la constante K para cada uno de las sustancias estudiadas, obtenidas aplicando un análisis de regresión usando el método de ajuste de mínimos cuadrados. En la tabla 6 se muestra el valor promedio de la mencionada constante.

Constante	Valor Numérico
K	0.53
±ΔK	0.01

CONCLUSIONES

1. La velocidad aparente de sedimentación calculada de datos experimentales es menor que la estimada haciendo uso la ecuación de Nakamura y Kuroda.

2. La velocidad aparente de sedimentación puede estimarse mediante la ecuación:

$$S' = S \{ 1 + 0,53 \left(\frac{H_0}{B} \right) \cos(\beta) \}$$

para suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado, sulfato de bario y óxido de plomo.

NOMENCLATURA

- A: Area de la sección transversal del sedimentador, cm².
- A': Superficie del plano inclinado, cm².
- B: Distancia entre las caras inclinadas de un sedimentador de sección rectangular, cm.
- C: Concentración de sólidos en la suspensión, g/l.
- D: Diámetro de un sedimentador de sección circular, cm.
- F: Parámetro de Fisher.
- F₀: Constante definida por la Ecuación(4).
- H: Altura de la interfase al tiempo t, cm.
- H₀: Altura inicial de la suspensión en el sedimentador, cm.

- K** : Constante definida por la ecuación(5).
q° : Flujo promedio del líquido claro por unidad de área del plano inclinado, $\text{cm}^3/(\text{min})(\text{cm}^2)$
Q_p : Caudal instantáneo de líquido clarificado que asciende por debajo de la cara inclinada del sedimentador, cm^3/min .
S' : Velocidad aparente de sedimentación, cm/min .
S : Velocidad de sedimentación, cm/min .
V_p : Contribución de la velocidad en el líquido clarificado por debajo de la cara inclinada del sedimentador, cm/min .
% : Porcentaje en peso de sólidos en la suspensión.

LETRAS GRIEGAS

- α** : Angulo que forma el sedimentador con la vertical, grados.
 β : Angulo que forma el sedimentador con la horizontal, grados.
 ρ_p : Densidad absoluta del sólido, g/ml .
 ρ : Densidad del agua, g/ml .

Bibliografía

- [1] Nakamura, H. y Kuroda, K.K., *Keijo J. Med.* **1**(8), 256(1937)
 [2] Bueno, J.L. y Gutiérrez, L.A., "Teoría y Práctica de la Sedimentación", *Ing. Quím.* **159**(1986).
 [3] Cheng, D. "Sedimentation of suspensions and storage Stability", *Chem. & Ind.*, **17** 407(1980).
 [4] Kynch, G.J., "A Theory of Sedimentation", *Trans. Faraday Soc.*, **48**, 166 (1952).
 [5] Scott, K., "Thickening Calcium Carbonate Slurries", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **7**(3), 484(1968).
 [6] Kos, P., "Review of Sedimentation and Thickening", *Fine Part. Process, Proc. Int. Symp.*, **2**, 1594(1980).
 [7] Tiller, F. M., "Review of Kynch Theory", *A. I. Ch. E. Journal*, **27** (5), 823(1981)
 [8] Fitch, F., "Kynch Theory and Compression Zones" *A. I. Ch. E. J.* **29**(6), 940(1983).
 [9] Boycott, A. E., *Nature*, **104**, 532(1920).
 [10] Kinoshita, K., *Coll. Sci.*, **4**, 525(1949)
 [11] Inouye, K., Uchibori, T., y Katsurai, T., *Kolloid Z.*, **139**, 167(1967).
 [12] Pearce, K., "Third Congress of European Federation of Chemical Engineering", *London*, **A30**(1962).

- [13] Graham, W., Lama, R., "Sedimentation in Inclined Vessels", *Can. J. Chem. Eng.* **41**, 31 (1963).
 [14] Ghosh, B., "Improved Sedimentation Process", *Indian Chem. Eng.*, **5**(1), 2(1963).
 [15] Lama, R., "Sedimentación de Suspensiones de Carbonato de Calcio en sedimentadores inclinados", Tesis de Título Profesional en Ing. Química, Lima - Perú, 1965.
 [16] Ghosh, B., y Vohra, O.K., *Indian Chem. Eng.*, **6**, 13(1971).
 [17] Ohsasa, K., Sambuichi, M., Nakakura, H., Shibuya, T., *Kagaku Kagaku Ronbunshu*, **8**, 291(1982).
 [18] Valdyanathan, K.L., Joseph, D.H. and Verhoff, F. H., "Indirect Measurement of Inclined Sedimentation for Ash in Coal Liquids at High Temperature and Pressure by X-Ray Photography", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **20**(2), 165(1981).
 [19] Zhavi, E., Rubin, E., "Settling of solid suspensions under and between inclined surfaces", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **14**(1), 34(1975).
 [20] Shiragami, N., Kajiuchi, T. y Hartayama, M., "Settling in a Tank by Inclined Plates", *Inter. Chem. Eng.*, **28**(4), 669(1988).
 [21] Zhang, K., Acrivos, A. y Triantafyllou, G. S., "On the Nature of the Instability in Buoyancy - Driven Flows in inclined Settlers", *Am. Inst. Physics*, **4**, 1156 (1992).
 [22] Neidig, H. A., Yingling, R. T. y Griswold, R.E., "Tratamiento estadístico de los datos experimentales", *Rev. Iber. Ed. Quím.* **4**, 18(1972).
 [23] Hildebrand, F.B., "Introduction to Numerical Analysis", **Ed. Mc Graw-Hill**, 1ra. Ed., New York, 1956.
 [24] Carnahan, B., Luther, H.A. y Wilkes, J.O. "Applied Numerical Methods", **Ed. John Wiley & Sons, Inc**, 1ra. Ed. New York, 1969.
 [25] Driper, N.R. y Smith, H. "Applied Regression Analysis", **Ed. John Wiley & Sons, Inc**. 2da. Ed. Nueva York 1981.
 [26] Spiridonov, V. P. y Lopatkin, A., "Tratamiento matemático de datos Físicoquímicos", **Ed. Mir**. 2da Ed., Moscú 1973.
 [27] Constantinedes, A., "Applied Numerical Methods with Personal Computers", **Mc Graw-Hill**, 1ra. ed., Nueva York, 1988.
 [28] Hatayama, H., Ichiki, K., "Statistical Theory of Sedimentation of Discordered Suspensions", *Physical Review*, **E51**, R3815(1995).