

MODELAMIENTO DE LA FENOMENOLOGÍA DEL ESPESAMIENTO EN EL TRATAMIENTO DE RELAVES METALÚRGICOS

Daniel F. Lovera Dávila (*), Alfredo Palomino Infante

Summary

In processing mineral ores to obtain high level concentrates with economical value, we face several problems, particularly in dealing with metal releases in order to meet the environmental rules concerning safe disposal of solid wastes.

The use of high capacity settling devices is required in order to get a good separation between solid-liquid in metallurgical releases, which allows us to obtain well consolidated solids, suitable for safe disposal and storage as well as to make possible the recycling of process water. All of these go toward the main objective of implementing environmentally clean technologies.

In this work we show the phenomenological modeling of the sedimentation process, which will allow an appropriate interpretation of the variables involved in the process, thus the implementation of the un control systems, as well as the easier physical and chemical characterization of wastes will be possible.

(*) Telefax N° 4521521 - 4253076. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica - UNMSM, Lima – Perú

I.-INTRODUCCION

Las estrategias avanzadas para el diseño de tecnologías limpias se caracterizan por reducir las emisiones de desechos, disminuyendo la generación de ellos en la fuente misma e implementando medidas para reducir el consumo de aguas, recuperar los recursos materiales y energéticos a través de reciclo e integración de procesos y una selección adecuada de las materias primas. Junto a ello, se ha puesto énfasis en el desarrollo de prácticas efectivas de gestión ambiental. [1]

El diseño de procesos limpios se basa en el uso de las herramientas clásicas de la ingeniería, para concebir un esquema de producción que considere tanto los aspectos técnico-económicos como los ambientales. Dichos objetivos son compatibles, ya que el impacto ambiental puede, en parte, ser reducido aumentando la productividad global del proceso. En muchos casos modificaciones con bajos requerimientos de capital han derivado en significativos incrementos en la productividad y una reducción en la generación de desechos. [1]

En ese contexto la presente investigación muestra la fenomenología de la separación sólido-líquido para optimizar el manejo de los relaves y la recuperación y/o posterior tratamiento del agua de proceso en las plantas metalúrgicas, de tal forma que el espesador que actúa como un pulmón pueda trabajar óptimamente, podemos encontrar las propiedades fisicoquímicas y reológicas de las pulpas. Así mismo que serán útiles para establecer su adecuada disposición final.

1.0. METODOS DE DISEÑO DE ESPESADORES

La revisión de los principales métodos de diseño disponibles en la literatura, muestran que se pueden agrupar en tres categorías: los basados en balances macroscópicos, los basados en la ecuación de balance cinemática y los basados en las ecuaciones de balance dinámico. Sólo este último grupo provee de una completa información para propósitos de diseño. [3]

1.1. MÉTODOS BASADOS EN BALANCES MACROSCÓPICOS

La primera ecuación que predice la capacidad de un espesador fue descubierta por Mishler en 1912 y corresponde a un simple balance de masa macroscópico en el equipo.

El método de diseño consiste de mediciones en el laboratorio de la velocidad de sedimentación inicial de una suspensión, con la concentración de alimentación de un espesador y calcular luego el área del espesador. El método al hacer el supuesto que la concentración en la zona II es la misma que la alimentación, lo invalida como método de diseño. [3]

Coe y Clevenger y otros autores asumen que la zona II de sedimentación obstaculizada se forma en un espesador con una dilución δ_K siendo la mínima capacidad de manejo de sólidos.

El método de diseño consiste en mediciones en el laboratorio, de la velocidad de sedimentación inicial de una suspensión en un rango de concentraciones entre la alimentación y la velocidad de sedimentación obstaculizada máxima (concentración crítica), luego se calcula el mínimo valor de la capacidad de manejo de sólidos (F/S). [11]

A las mismas conclusiones llegaron Taggart y Dalstrom y Fitch pero expresando en otras unidades el área unitaria básica AUo.

1.2. MÉTODOS BASADOS EN MODELOS CINEMÁTICOS

El establecimiento de la teoría de Sedimentación de Kynch [5] en 1952 abrió un nuevo campo a la investigación, la consideración del diseño del espesador desde un punto de vista teórico y en esta ruta tener a la mano un método rápido y seguro para el diseño de espesadores.

Numerosos investigadores se involucraron en este trabajo teniendo sus nombres asociados a los procedimientos de diseño de espesadores. Podemos mencionar entre ellos a W.P. Talmage, B. Fitch, J.H Wilhelm, Y. Nadie, H. Oltmann, N.J Hasset y N. Yoshioka. [2,3]

Talmage y Fitch , asumieron en 1955 que la sedimentación batch de una suspensión puede ser representado por la teoría de Kynch y además la velocidad de sedimentación para una concentración ϕ_K puede expresarse como la pendiente en cada punto del gráfico (z,t) y a partir de estos datos podemos calcular el área unitaria básica AUo. [3]

Fitch y Stevenson en 1976 propusieron el uso de una variante empírica al método de Talmage y Fitch, el método de Oltmann. Ambos realmente identificaron el punto de compresión crítico, para luego calcular el área unitaria básica AUo. [7,11]

Yoshioka descubrió en 1957 un método de diseño gráfico de espesadores basados en una función de densidad de flujo total de sólidos, y a partir de un tratamiento analítico encontrar también el área unitaria básica AUo.

Wilhelm y Nadie en 1979 también usaron la función de densidad de flujo continua al estado estacionario para calcular el AUo. [3]

1.3. MÉTODOS BASADOS EN MODELOS DINÁMICOS

El principal exponente de los métodos dinámicos es Adorjan. Sin embargo es poco usado en la industria minera, habiendo publicado en 1975 y 1976. Otros investigadores posteriormente emplearon los métodos dinámicos, entre otros Damasceno, Concha y Barrientos. [3,14]

El principal problema asociado con los métodos dinámicos es la determinación experimental de los parámetros materiales de la pulpa. En el trabajo original, Adorjan propuso el uso de la celda de compresión para determinar la compresibilidad del sedimento. Desafortunadamente las

celdas de compresión requieren de elevadas presiones que aquellas producidas por el peso medio de la pulpa en el espesador.

Es más conveniente la medición de otras variables y calcular el esfuerzo efectivo de los sólidos. Por ejemplo el gradiente de concentración puede ser calculado en un test batch o continuo por modelamiento, por absorción de rayos gamma, por absorción de rayos X, por absorción ultrasónica y mediciones de capacitancia y el gradiente de presión de exceso de los poros puede ser medido con un manómetro. Basados en esta información el esfuerzo efectivo de sólidos puede ser calculado, así como la permeabilidad del sedimento. [3,9]

1.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

1.4.1. Formulación del Problema

La teoría de la sedimentación unidimensional tiene modelos matemáticos estándares para estudiar el fenómeno de sedimentación, sin embargo, como se ha señalado, el camino de solución se ha abordado empleando: la teoría clásica de Kynch el método de características y el empleo de los métodos numéricos de solución. [3, 4, 15] En este trabajo, a diferencia de los métodos citados buscamos la solución analítica de las ecuaciones de balance, considerando las ecuaciones diferenciales como tales (sin simplificar) y son resueltas haciendo uso del método de separación de variables [6, 8, 13, 16, 18]

El diagrama de flujo sintetiza las ecuaciones de balance para los proceso Cinemáticas y Dinámicos que son resueltas analíticamente para generar el modelo matemático que la presente investigación tiene por objetivo encontrar y analizar.

1.4.2. Ecuación General del Proceso Dinámico de Sedimentación Continua

Una suspensión floculada puede ser descrita por las variables de campo:

Fracción volumétrica de sólidos $f(z,t)$, Densidad de flujo de sólidos $q(z,t)$, Velocidad volumétrica $q(z,t)$ y la Presión de poros en exceso $P_e(z,t)$

En el dominio $R = \{(z,t) / 0 < z < 1, 0 < t\}$ ellas deben cumplir las ecuaciones:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$f = q\phi + f_{bk}(\phi) \left(1 + k(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial z} = -\Delta\rho\phi g \left(1 + k(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3.4)$$

Y en las discontinuidades son válidas las ecuaciones de Rankine Hugoniot y la Condición de Entropía de Lax [3,4]:

$$\sigma(\phi^+, \phi^-) = f_b^+ - f_b^- / \phi^+ - \phi^- \dots\dots\dots (3.5)$$

$$f_b^+(\phi^+) \geq \sigma(\phi^+, \phi^-) \geq f_b^-(\phi^-) \dots\dots\dots (3.6)$$

Reemplazando (3.3) en (3.1) para obtener:

Ecuación General del Proceso Dinámico de Sedimentación Continua:

$$(\partial\phi)/\partial t + \partial/\partial Z \{q(t)\phi + f_{bk}(\phi)(1 + k(\phi)\frac{\partial\phi}{\partial Z})\} = 0 \dots\dots\dots (3.7)$$

1.4.3. Modelo Matemático

De la resolución de la ecuación (3.7) por el método de variables separables podemos mostrar la solución para el caso de pulpas floculadas; dados por el modelo matemático MOSISED I: [17,19]

I) Modelo Fenomenológico: Velocidad de Sedimentación - Fracción Volumétrica

$$V_s = C_2\phi^{C1} \dots\dots\dots (3.8)$$

II) Modelo Fenomenológico: Flujo de Densidad de Sólidos - Fracción Volumétrica

$$f_{bk}(\phi) = C_2\phi^{C3} \dots\dots\dots(3.9)$$

III) Modelo Fenomenológico Fracción Volumétrica de Sólidos - Altura de Interfase

Se desdobra en tres regímenes, que se describen a continuación:

A) Régimen de Sedimentación Obstaculizada

Tomando logaritmos y haciendo reemplazos convenientes a la ecuación fracción volumétrica de sólidos y el grupo adimensional correspondiente régimen de Sedimentación Obstaculizada, se tiene la siguiente expresión:

$$\phi < \phi_c$$

$$\ln \phi = N_1 - M_1Z \dots\dots\dots (3.10)$$

Donde:

$$N_1 = \ln\phi_o + \left(\frac{L + V_s t_c}{L - Z_c + V_s t_c} \right) \ln \left(\frac{\phi_c}{\phi_o} \right) \quad (3.11)$$

$$M_1 = \left(\frac{1}{L - Z_c + V_s t_c} \right) \ln \left(\frac{\phi_c}{\phi_o} \right) \quad (3.12)$$

B) Régimen de Lecho Poroso

Haciendo lo mismo al caso anterior con la ecuación para la fracción volumétrica de sólidos y el grupo adimensional del régimen de lecho poroso llegamos a la siguiente expresión:

$$\phi_c < \phi < \phi_{cc}$$

B1. Para Vs. = Constante

$$\ln \phi = N_2 - M_2 Z \dots \dots \dots (3.13)$$

Donde:

$$N_2 = \ln \phi_0 + \left(\frac{\int_{t_c}^t V_s dt}{\int_{t_c}^t V_s dt - V_s \int_{Z_c}^{Z_{cc}} \frac{dZ}{V_s}} \right) \ln \left(\frac{\phi_{cc}}{\phi_c} \right)$$

$$M_2 = \left(\frac{V_s}{\int_{t_c}^{t_{cc}} V_s dt - V_s \int_{Z_c}^{Z_{cc}} \frac{dZ}{V_s}} \right) \ln \left(\frac{\phi_{cc}}{\phi_c} \right) \quad (3.16)$$

B2. Para Vs. = Variable

$$\phi^n = \alpha + \beta Z \dots \dots \dots (3.17)$$

C) Régimen de Consolidación

Análogamente a los casos anteriores podemos llegar a definir la siguiente expresión matemática:

$$\Phi_{cc} < \phi \leq \phi_D$$

$$\ln \phi = N_3 - M_3 Z \dots \dots \dots (3.18)$$

Donde:

$$N_3 = \ln \phi_D + \left(\frac{Z_{cc} + V_s(t - t_c)}{Z_{cc} - Z_D + V_s(t_D - t_{cc})} \right) \ln \left(\frac{\phi_D}{\phi_{cc}} \right) \quad (3.19)$$

$$M_3 = \left(\frac{1}{Z_{cc} - Z_D + V_s(t_D - t_{cc})} \right) \ln \left(\frac{\phi_D}{\phi_{cc}} \right) \quad (3.20)$$

Las constantes M_i y N_i se pueden evaluar a partir de datos experimentales tanto de pruebas batch, así como también continuas; a continuación se cuantificará dichos parámetros a partir de los datos experimentales siguientes:

- i) Datos Experimentales de E. W Comings [10]
- ii) Datos Experimentales de Espesadores Piloto - Universidad de Concepción-Chile [15]

II.-EXPERIMENTACION

Pruebas desarrolladas en el Laboratorio A. Sutulov de la Universidad de Concepción - Chile bajo el marco del proyecto Fondef MI08, a nivel probeta y como también con espesadores piloto del tipo convencional y de alta capacidad sirven como data experimental de esta presente investigación, empleando una mezcla de relaves de plantas concentradoras chilenas los modelos desarrollados serán válidas con esos datos y con valores reportados por Comings y otras investigaciones publicadas. Aquí elegimos la velocidad de sedimentación, la función densidad de flujo de sólidos y los perfiles de concentración para su evaluación y posterior análisis y discusión.

III.-DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 VELOCIDAD DE SEDIMENTACION

3.1.1. Velocidad de Sedimentación para Suspensiones no Floculadas

La ecuación fenomenológica de la velocidad de sedimentación con la fracción volumétrica de sólidos, a la cuál denominaremos ecuación LP [19], deducida a partir de la aplicación del método de variables separables a las ecuaciones de balance del proceso de sedimentación, es contrastada con otros modelos existentes (Ver Tabla N° 3.1)

A partir de datos experimentales de pulpas no floculadas de una mezcla de relaves de minerales de cobre.

TABLA N° 3.1		
Comparación Global de Modelos para Velocidad de Sedimentación		
Función ϕ	Modelo Matemático	Nombre
ϕ	$V_s = C_2 \phi^{c_1}$	Ecuación LP (Este trabajo)
$(1 - \phi)$	$V_s = U_\infty (1 - \phi)^n$	Richardson y Zaki
$(1 - (\phi / \phi_m))$	$V_s = U_\infty (1 - (\phi / \phi_m))^{4.85}$	Michaels y Bolger
ϕ	$V_s = -\alpha \phi^{-\beta}$	Wilhelm y Nadie
$(1/\phi - 1/\phi_m)$	$V_s = K(1/\phi - 1/\phi_m)^m$	Hogg y Bunnaul

Para pruebas experimentales de velocidad de sedimentación en función de la Fracción Volumétrica de Sólidos, para pulpas no floculadas de una mezcla de relaves se tiene las siguientes expresiones matemáticas (ver Tabla N° 3.2):

TABLA N° 3.2		
Contrastación de la Velocidad de Sedimentación para distintos Modelos sin floculante.		
Modelo Matemático	Coefficiente de correlación r^2	Nombre
$V_s = 3.15466 \times 10^{-5} \phi^{-1.687260631}$	$R^2 = 0.90469907$	Ecuación LP
$V_s = 0.00078056(1 - \phi)^{13.0698023}$	$R^2 = 0.99024127$	Richardson y Zaki
$V_s = 0.000662(1 - \phi/0.4470575)^{4.85}$	$R^2 = 0.99314374$	Michaels y Bolger
$V_s = 1.56969 \times 10^{-5} (1/\phi - 2.564)^{1.18577}$	$R^2 = 0.99409359$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 0g/TMS		

En la figura 3.1 podemos apreciar la contrastación de los modelos matemáticos con los datos experimentales, notándose que todos tienen la misma forma exponencial.

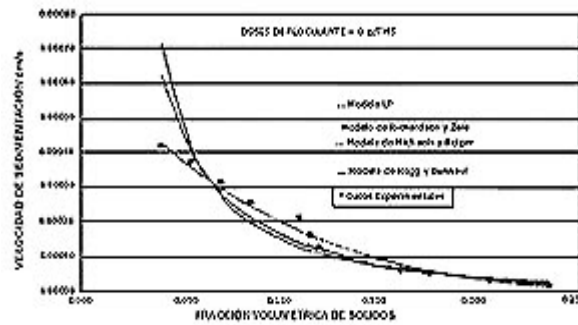


Figura 3.1: Velocidad de Sedimentación vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. F=0g/TMS

3.1.2. Velocidad de Sedimentación para Suspensiones Floculadas

Para pruebas de Velocidad de Sedimentación versus Fracción Volumétrica de Sólidos para pulpas de mezcla de relaves floculadas (Dosis 3,6 y 9 g/TMS) se tiene los siguientes resultados:

TABLA N° 3		
Contrastación de la Velocidad de Sedimentación para distintos Modelos para dosis de floculante de 3g/TMS.		
Modelo Matemático	Coefficiente de correlación r^2	Nombre
$V_s = 1.6797 \times 10^{-5} \phi^{-2.55407893}$	$R^2 = 0.95142449$	Ecuación LP
$V_s = 0.006711305(1 - \phi)^{19.44405186}$	$R^2 = 0.99432704$	Richardson y Zaki
$V_s = 0.004643(1 - \phi / 0.34647914)^{4.85}$	$R^2 = 0.98482283$	Michaels y Bolger
$V_s = 7.1549 \times 10^{-5}(1 / \phi - 3.704)^{1.291451}$	$R^2 = 0.99234423$	Hogg y Bunnal
Dosis de Floculante: 3g/TMS		

Todas estas funciones las podemos apreciar mejor en la figura 3.2 en el que se mantiene la tendencia exponencial contrastada con los datos experimentales.

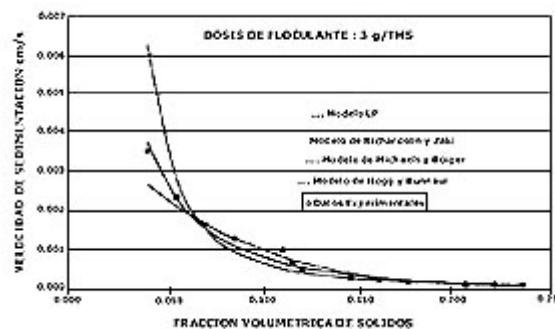


Figura 3.2: Velocidad de Sedimentación vs. Fracción de Sólidos. F= 3g/TMS

Para una dosis de floculante de 6 g/TMS se tiene las siguientes funciones matemáticas mostradas en la Tabla N° 3.4 y ploteadas todas ellas en la figura 3.3

TABLA N° 3.4		
Contrastación de la Velocidad de Sedimentación para distintos Modelos para dosis de floculante de 6g/TMS.		
Modelo Matemático	Coefficiente de correlación r^2	Nombre
$V_s = 2.24275 \times 10^{-5} \phi^{-2.421857567}$	$R^2 = 0.96772032$	Ecuación LP
$V_s = 0.00566269(1 - \phi)^{18.1708229}$	$R^2 = 0.991723088$	Richardson y Zaki
$V_s = 0.004288(1 - \phi / 0.3550483)^{4.85}$	$R^2 = 0.977729200$	Michaels y Bolger
$V_s = 9.76761 \times 10^{-5} (1 / \phi - 3.846)^{1.1279}$	$R^2 = 0.997883616$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 6g/TMS		

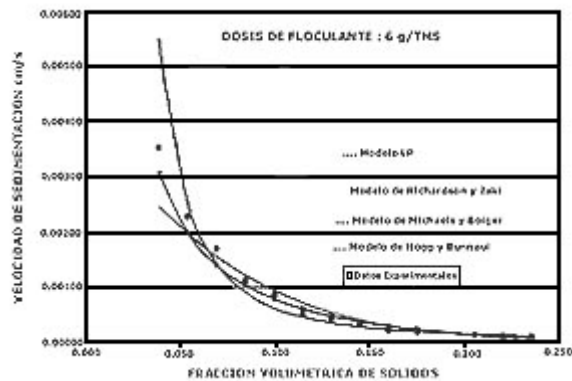


Figura 3.3: Velocidad de Sedimentación vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. F=6g/TMS

Para una dosis de floculante de 9 g/TMS se tiene las siguientes funciones matemáticas mostradas en la Tabla N° 3.5 y ploteadas todas ellas en la figura 3.4.

TABLA N° 3.5		
Contrastación de la Velocidad de Sedimentación para distintos Modelos para dosis de floculante de 9g/TMS.		
Modelo Matemático	Coefficiente de correlación r^2	Nombre
$V_s = 5.6225 \times 10^{-5} \phi^{-2.14790784}$	$R^2 = 0.98629586$	Ecuación LP
$V_s = 0.00487119(1 - \phi)^{14.8929914}$	$R^2 = 0.94936827$	Richardson y Zaki
$V_s = 0.004511(1 - \phi / 0.3938335)^{4.85}$	$R^2 = 0.93153739$	Michaels y Bolger
$V_s = 3.1973 \times 10^{-5} (1 / \phi - 2.083)^{1.589362}$	$R^2 = 0.99146964$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 9g/TMS		

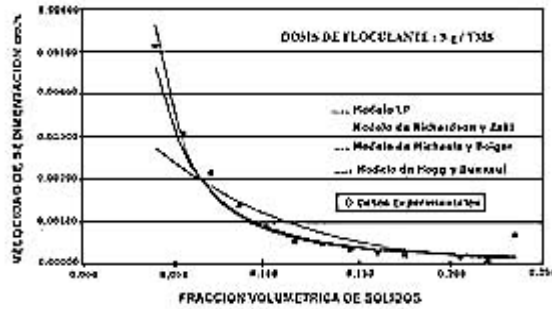


Figura 3.4: Velocidad de Sedimentación vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. F=9g/TMS

3.2. FUNCIÓN DENSIDAD DE SÓLIDOS

En cuanto a la Función Densidad de flujo variable introducida por Richardson y Zaky, es bien empleada en el diseño de espesadores y análisis de datos experimentales de sedimentación, es por ello que se usa aquí para evaluar el modelo contra los otros que la literatura nos provee conforme se puede apreciar en la tabla N° 3.6 [19].

TABLA N° 3.6	
Comparación Global de Modelos para Función Densidad de Flujo de Sólidos	
Función Densidad de Flujo de Sólidos	Modelo Matemático
$f_{bk}(\phi) = C_2 \phi^{c_3}$	Ecuación LP (Este trabajo)
$f_{bk}(\phi) = U_o \phi (1 - \phi)^n$	Richardson y Zaki
$f_{bk}(\phi) = U_o \phi (1 - \phi / \phi_m)^{4.85}$	Michaels y Bolger
$f_{bk}(\phi) = -\alpha \phi^{-\beta+1}$	Wilhelm y Nadie
$f_{bk}(\phi) = K \phi (1 / \phi - 1 / \phi_m)^m$	Hogg y Bunnaul

3.2.1. Función Densidad de Flujo de Sólidos para suspensiones no floculadas

Para pruebas experimentales de la Función Densidad de Flujo de Sólidos en función de la Fracción Volumétrica de Sólidos, para pulpas no floculadas de una mezcla de relaves se tiene las siguientes expresiones matemáticas: ver Tabla N° 3.7 y la figura 3.5.

TABLA N° 3.7		
Contrastación de la Velocidad de Sedimentación para distintos Modelos sin dosis de floculante.		
Función Densidad de Flujo de Sólidos	Coefficiente de correlación r^2	Modelo Matemático
$f_{bk}(\phi) = 3.15466 \times 10^{-5} \phi^{-0.687260631}$	$R^2 = 0.90469907$	Ecuación LP
$f_{bk}(\phi) = 0.00078056 \phi (1 - \phi)^{13.0695023}$	$R^2 = 0.99024127$	Richardson y Zaki
$f_{bk}(\phi) = 0.000662 \phi (1 - \phi / 0.4470575)^{4.85}$	$R^2 = 0.99314374$	Michaels y Bolger
$f_{bk}(\phi) = 1.56969 \times 10^{-5} \phi (1 / \phi - 2.083)^{1.18577}$	$R^2 = 0.99409359$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 0 g/TMS		

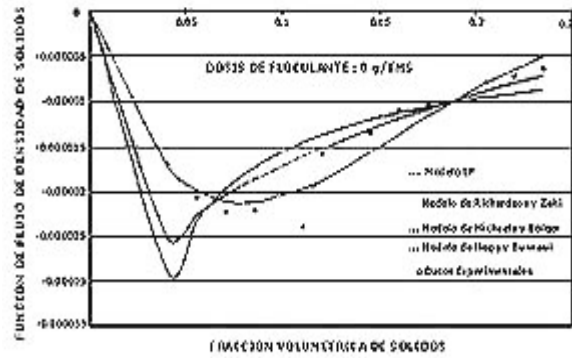


Figura 3.5: Función de Densidad vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. F=0/TMS

3.2.2. Función Densidad de Flujo de Sólidos para Suspensiones Floculadas

Pero para pruebas de Función de Densidad de Flujo de Sólidos versus Fracción Volumétrica de Sólidos para pulpas de mezcla de relevés floculadas (Dosis 3, 6 y 9g TMS) se tiene los siguientes resultados:

TABLA N° 3.8		
Contrastación de la función de densidad de flujo de sólidos para distintos Modelos con dosis de floculante (3g/TMS)		
Función Densidad de Flujo de Sólidos	Coefficiente de correlación r^2	Modelo Matemático
$f_{bk}(\phi) = 1.6797 \times 10^{-5} \phi^{-1.55407893}$	$R^2 = 0.95142449$	Ecuación LP
$f_{bk}(\phi) = 0.0067113056 \phi (1 - \phi)^{19.44405185}$	$R^2 = 0.99432704$	Richardson y Zaki
$f_{bk}(\phi) = 0.004843 \phi (1 - \phi / 0.34647914)^{4.85}$	$R^2 = 0.98482283$	Michaels y Bolger
$f_{bk}(\phi) = 7.1549 \times 10^{-5} \phi (1 / \phi - 3.704)^{1.291451}$	$R^2 = 0.99234423$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 3g/TMS		

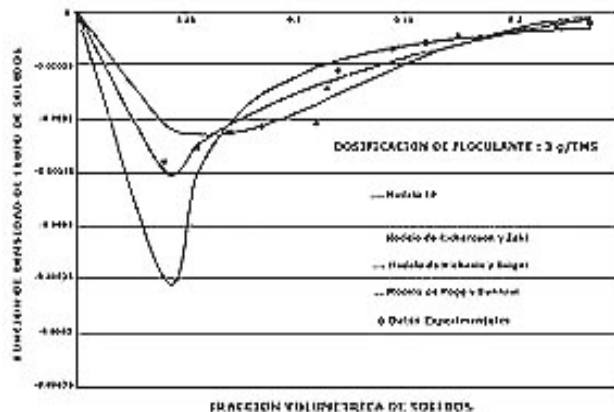


Figura 3.6: Función de Densidad vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. F=3/TMS

TABLA N° 3.9		
Contrastación de la función de densidad de flujo de sólidos para distintos Modelos con dosis de floculante (6g/TMS)		
Función Densidad de Flujo de Sólidos	Coefficiente de correlación r^2	Modelo Matemático
$f_{bk}(\phi) = 2.24275 \times 10^{-5} \phi^{-1.424667667}$	$R^2 = 0.96772032$	Ecuación LP
$f_{bk}(\phi) = 0.00056627 \phi (1 - \phi)^{19.1708229}$	$R^2 = 0.991723088$	Richardson y Zaki
$f_{bk}(\phi) = 0.004288 \phi (1 - \phi / 0.3550483)^{4.85}$	$R^2 = 0.977729200$	Michaels y Bolger
$f_{bk}(\phi) = 9.76761 \times 10^{-5} \phi (1 / \phi - 3.846)^{1.1279}$	$R^2 = 0.997883616$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 6 g/TMS		

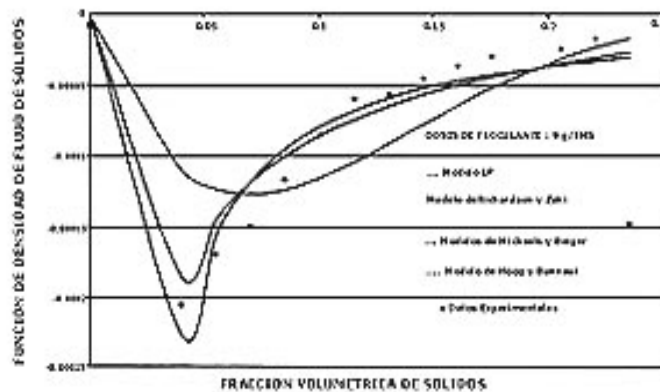


Figura 3.7: Función de Densidad vs. Fracción Volumétrica de Sólidos.
F=6/TMS

TABLA N° 3.10		
Contrastación de la función de densidad de flujo de sólidos para distintos Modelos con dosis de floculante (9g/TMS)		
Función Densidad de Flujo de Sólidos	Coefficiente de correlación r^2	Modelo Matemático
$f_{bk}(\phi) = 5.6225^{-5} \phi^{-1.14790784}$	$R^2 = 0.98629586$	Ecuación LP
$f_{bk}(\phi) = 0.00487119 \phi (1 - \phi)^{14.8959914}$	$R^2 = 0.94936827$	Richardson y Zaki
$f_{bk}(\phi) = 0.004511 \phi (1 - \phi / 0.3938335)^{4.85}$	$R^2 = 0.93153739$	Michaels y Bolger
$f_{bk}(\phi) = 3.1973 \times 10^{-5} \phi (1 / \phi - 2083)^{1.589352}$	$R^2 = 0.99146964$	Hogg y Bunnaul
Dosis de Floculante: 9g/TMS		



Figura 3.8: Función de Densidad de Sólidos vs. Fracción Volumétrica de Sólidos. $F = 9\text{g/TMS}$

3.3. PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS: MODELO (MOSISED)

3.3.1. Datos Experimentales de E.W. Comings (10)

A) Prueba Experimental de Sedimentación Batch N° 1

Sólido: CaCO_3

Altura Inicial: 35 Pulgadas

Evaluando los parámetros de sedimentación de las expresiones (3.11), (3.12) (3.14), (3.15), (3.19) y (3.20), a partir de los datos experimentales de E.W Comings; podemos escribir las ecuaciones de modelamiento para cada régimen (3.10), (3.13) y (3.18). A continuación mostramos el set de ecuaciones de modelamiento:

Ecuaciones de Modelamiento Matemático:

REGIÓN I: $\phi = \text{Exp} (3.884 - 0.0048 Z)$

REGIÓN II: $\phi = \text{Exp} (4.094 - 0.028 Z)$

REGIÓN III: $\phi = \text{Exp} (8.223 - 1.721 Z)$

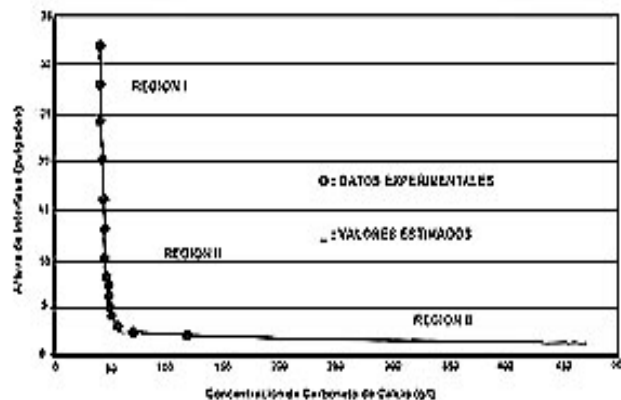


Figura 3.9: Perfil de concentración simulada y datos experimentales.

B) Prueba Experimental de Sedimentación Batch N° 2

Sólido: CaCO_3

Altura Inicial : 30 Pulgadas

Evaluando los parámetros de sedimentación de las expresiones (3.11), (3.12), (3.14), (3.15), (3.19) y (3.20), a partir de los datos experimentales de E.W Comings para una altura de interfase de 30 pulgadas; podemos escribir las ecuaciones de modelamiento para cada régimen (3.10), (3.13) y (3.18). A continuación mostramos el set de ecuaciones de modelamiento:

REGIÓN I: $\phi = \text{Exp}(4.019 - 0.008 Z)$

REGIÓN II: $\phi = \text{Exp}(4.623 - 0.109 Z)$

REGIÓN III: $\phi = \text{Exp}(5.726 - 0.289 Z)$

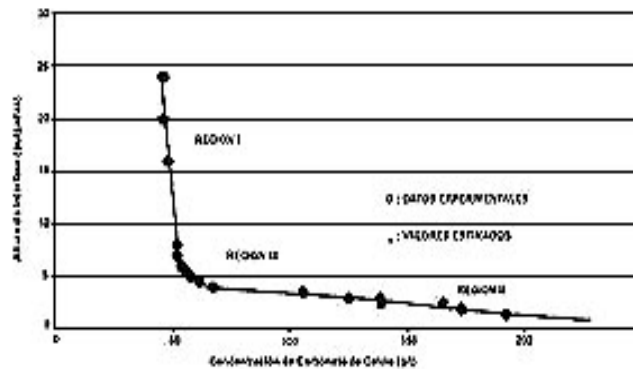


Figura 3.10: Perfil de concentración simulada con datos experimentales.

C) Prueba Experimental de Sedimentación Batch N° 3

Sólido: CaCO_3

Altura Inicial: 20 Pulgadas

Evaluando los parámetros de sedimentación de las expresiones (3.11), (3.12), (3.14), (3.15), (3.19) y (3.20), a partir de los datos experimentales de E.W. Comings para una altura de interfase de 20 pulgadas; podemos escribir las ecuaciones de modelamiento para cada régimen (3.10), (3.13) y (3.18). A continuación mostramos el set de ecuaciones de modelamiento:

REGIÓN I: $\phi = \text{Exp}(4.525 - 0.0486 Z)$

REGIÓN II: $\phi = \text{Exp}(5.427 - 0.150 Z)$

REGIÓN III: $\phi = \text{Exp}(5.537 - 0.104 Z)$

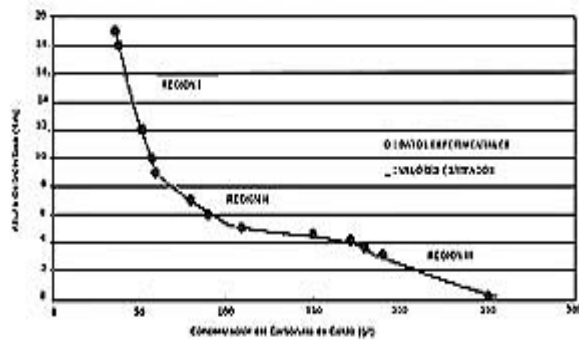


Figura 3.11: Perfil de concentración simulada con datos experimentales.

3.3.2. Datos Experimentales de Espesadores Piloto - Universidad de Concepción

A) Prueba Experimental de Sedimentación Continua N° 01 (15)

Sólido: Relaves de Concentrados de Cobre

Alimentación: $\phi = 0.055$

Evaluando los parámetros de sedimentación de las expresiones (3.11), (3.12), (3.14), (3.15) y (3.20), a partir de los datos experimentales del Laboratorio A. Sutulov de la Universidad de Concepción Chile, para una alimentación de 0.055 de fracción volumétrica de sólidos de relaves de concentrados de cobre; podemos escribir las ecuaciones de modelamiento para cada régimen (3.10), (3.13) y (3.18). A continuación el set de ecuaciones de modelamiento:

REGIÓN I: $\phi = \text{Exp}(25.529 - 1.285 Z)$

REGIÓN II: $\phi = \text{Exp}(-3.463 - 0.0113 Z)$

REGIÓN III: $\phi = \text{Exp}(-2.209 - 0.286 Z)$

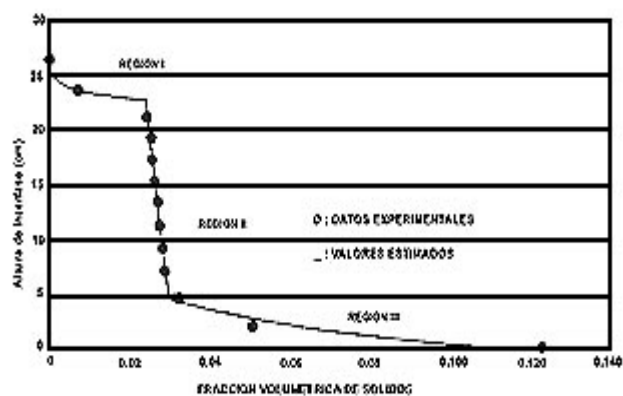


Figura 3.12: Perfil de Fracción Volumétrica simulada y los datos experimentales

B) Prueba Experimental de Sedimentación Continua N° 02

Sólido: Relaves de Concentrados de Cobre

Alimentación: $\phi_0 = 0.078$

Evaluando los parámetros de sedimentación de las expresiones (3.11), (3.12), (3.14), (3.15), (3.19) y (3.20), a partir de los datos experimentados del Laboratorio A. Sutulov de la Universidad de Concepción Chile, para una alimentación de 0.078 de fracción volumétrica de sólidos de relaves de concentrados de cobre; podemos escribir las ecuaciones de modelamiento para cada régimen (3.10), (3.13) y (3.18). A continuación mostramos el set de ecuaciones de modelamiento:

REGIÓN I: $\phi = \text{Exp}(4.420 - 0.434 Z)$

REGIÓN II: $\phi = \text{Exp}(-2.473 - 0.0996 Z)$

REGIÓN III: $\phi = \text{Exp}(-1.737 - 0.147 Z)$

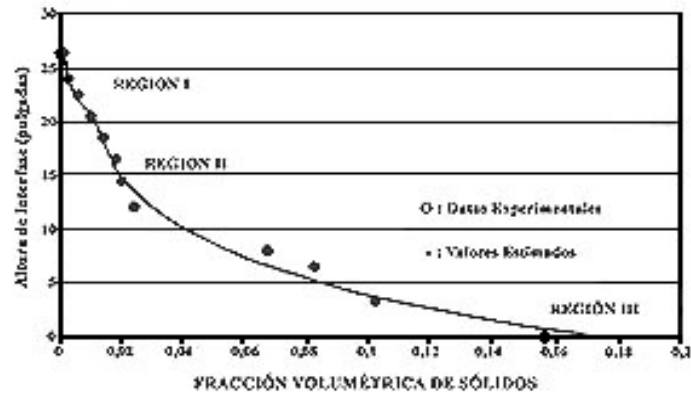


Figura 3.13: Perfil de Concentración simulada y datos experimentales

IV.- Comparación de datos Experimentales con los Estimados

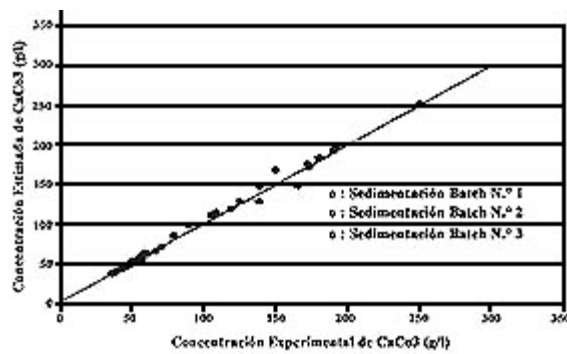


Figura 3.14: Comparación de Datos Experimentales con los estimados - E.W. Comings

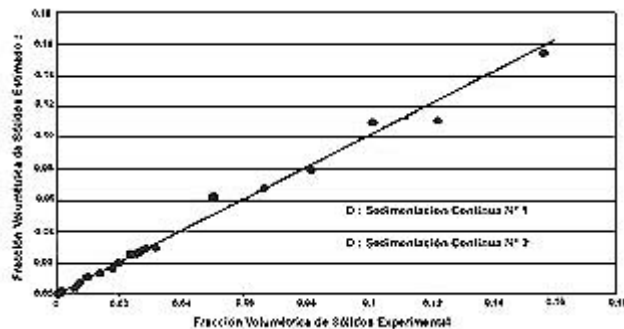


Figura 3.15: Comparación de Datos Experimentales con los Estimados - Universidad de Concepción.

V.-CONCLUSIONES

1. El Modelo LP obtenido en este trabajo, soportado en el contraste con otros modelos, prueba que las soluciones obtenidas son físicamente consistentes, así como matemáticamente correctas. Otorga fundamentación teórica a modelos fenomenológicos y empíricos de formas exponenciales y potenciales, tales como: $\phi V(\) = C1\phi^{C2}$ y $F_{bk} = C1\phi^{C3}$, para interpretar la velocidad de sedimentación y la densidad de flujo de sólidos respectivamente.
2. El modelo LP que interpreta la velocidad de sedimentación usando floculantes permite alcanzar mejor precisión, comparado con otros modelos usados para el diseño comercial de espesadores y clarificadores, tales como Richardson y Zaky, Michaels y Bolger.
3. El modelo de las tres zonas de sedimentación (MOSISED-I), desarrollado en este trabajo, simula acertadamente los perfiles de concentración para pruebas de sedimentación batch y continua, abriendo la posibilidad para futuras investigaciones en el campo de la sedimentación de pulpas industriales; específicamente en el lecho poroso y la consolidación.
4. Mediante el uso de los parámetros encontrados en la solución analítica, podemos cuantificar el esfuerzo efectivo de sólidos y la permeabilidad del sedimento, siendo posible realizar avances en la predicción de los parámetros físico-químicos, de las pulpas industriales lo cual permitirá un mejor manejo de los sólidos y así poder controlar sus impactos ambientales.
5. El presente estudio será de utilidad para el diseño, control y optimización de los espesadores tanto convencionales, de alta eficiencia y de alta capacidad; en el marco de las tecnologías limpias.

VI.-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bustos, MC y Concha F. 1988a. On the Construction of Global weak solutions in the Kynch theory of Sedimentation. Math Meth Appl. Sci., 10: 245-264
2. Bustos, MC y Concha F. and Wendland W., 1990. Global weak Solutions to the problem of Continuous of an ideal Suspension. Math Meth Appl. Sci., 13: 1-22
3. Concha F. and Barrientos, A. 1980. Phenomenological theory of Thickening. Eng. Foundation Conference. New Hampshire.
4. Bustos, MC y Concha F. 1988b. Simulación de sedimentación por lotes con compresión. AIChE., 34:859-361.
5. Kynch, GJ, 1952. Teoría de la sedimentación. Trans. Faraday Soc., 48:1 66-175.
6. Lovera. DF, 1995. Solución Analítica de la Ecuación de Kynch EXTENDIDA. Comunicación Interna de la Universidad de Concepción -. Chile
7. Fitch EB y Stevenson DG (1977) Gravity equipos de separación en equipos de separación sólido scale-up. Ed. DB Purchas, altiplanicies Press Ltd., Croydon Inglaterra.
8. Lovera DF Proceso de sedimentación Cinemática, Dinámica Con de Pulpas Metalúrgicas. VII Congreso Nacional de Metalúrgica, Huancayo, Perú 1997.
9. Huang SM et al. Tomographia imágenes de dos - el flujo de componente mediante sensores de capacitancia. J. Phys. E: Scient. Instr. V.22. 173-177 (1989).
10. Idas EW, Pruiss CE y Debord C. Continuo asentamiento y engrosamiento. Industrial e Ingeniería. Química Vol.. 46, N ° 6, junio (1954) 1164-1172.

11. Fitch. B. Ensayos de lotes predecir el rendimiento espesante. Ingeniería Química, 23 de agosto 1971: 83-88
12. Coe. SA, y Clevenger GH (1916). Los métodos para la determinación de la capacidad de los tanques de sedimentación del limo. AIME 55: 356-385.
13. Trofimchuk, S. 1998, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile - Santiago - Chile, Comunicación personal.
14. Damasceno JJ (1992) Uma Contribuição ao Estudo do Espesamento Continuo. Dr. Tesis COPPE de la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil.
15. Concha., F., Proyecto FONDEF MI08, Universidad de Concepción, Chile.
16. Pinto, S., 1998, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile - Santiago - Chile, Comunicación personal.
17. D. Daniel Lovera, 1999. Modelamiento y Simulación del Proceso Cinemático y Dinámico de sedimentación. UNMSM.
18. Salas., E., 1998, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grado Publicar Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú, Comunicación personal.
19. Palomino. A., y Lovera DF, (1999) Modelamiento del Proceso de sedimentación Cinemático y Dinámico. I Congreso Nacional "La Ingeniería de Procesos en el Desarrollo Industrial del País". Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú.
20. Hogg R. Y Bunnal P. sedimentos compresibilidad en el engrosamiento de las suspensiones floculadas. Minerales y procesamiento metalúrgico, 184-188, noviembre de 1992.