

UTILIZACION DEL COMPUTADOR EN EL DISEÑO Y SIMULACION DE ESPESADORES

CUSTODIO VAZQUEZ QUINTERO

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.
Profesor titular, Dpto Ing. Metalúrgica, UIS

LUIS ORLANDO AGUIRRE R.

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc.
Profesor Titular, Dpto Ing. Metalúrgica, UIS

RESUMEN

Se revisan en este trabajo las ecuaciones generales para la descripción del movimiento de una sistema bifásico (Sólido fluido); con base en ellas, se deducen las ecuaciones que rigen el comportamiento de un espesador en régimen estacionario. Se aplican los métodos de diseño de Coe-Clevenger y Adorjan. Mediante un modelo matemático se simula el comportamiento de la pulpa en el espesador diseñado para obtener gráficamente:

- El perfil de fracción volumétrica de sólidos (H y ϕ_D) conocido A (alimentación).
- El perfil de fracción volumétrica de sólidos y A para un ϕ_D determinado.
- El perfil de fracción volumétrica de sólidos y la capacidad máxima del espesador para distintos valores de ϕ_D .

INTRODUCCION

En el procesamiento de minerales, una gran parte de las operaciones de molienda y concentración requieren que el mineral se encuentre mezclado con agua formando una suspensión. En la extracción de metales por vía hidrometalúrgica el mineral se encuentra mezclado con una solución formando también una suspensión.

Una vez obtenido el concentrado y la colas ó la solución de metal y el residuo es necesario separar los sólidos del fluido. En ambos casos interesa que el producto contenga una mínima cantidad de agua para reducir el consumo de combustible o el costo de transporte. Esta separación se efectúa mediante el espesamiento, la filtración y el secado. La eficiencia del espesamiento se mide, en este caso, a través del porcentaje de sólidos logrando en la descarga, el que debe ser el máximo posible.

ASPECTOS TEORICOS

Se denomina espesamiento o espesaje la operación de separar mediante el mecanismo de la sedimentación parte del agua de una suspensión para obtener una pulpa de mayor concentración de sólidos y flujo de agua clara.

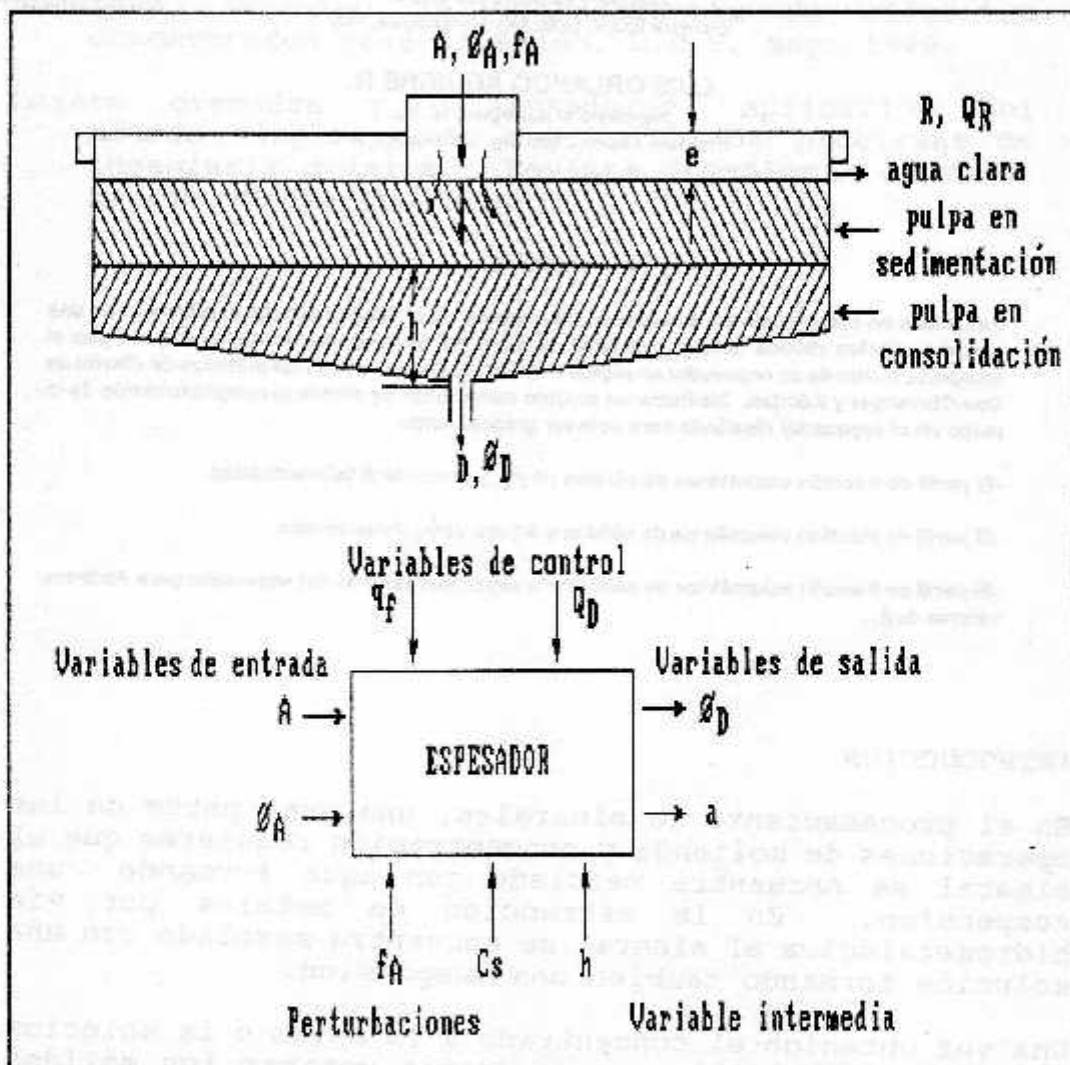


Figura 1. Espesador continuo y variables en el espesamiento.

El espesamiento se lleva a cabo en equipos denominados espesadores, que son recipientes cilíndricos que tienen mayor diámetro que altura, provistos de una alimentación central en su parte superior y una descarga central en el fondo. El fondo tiene una leve inclinación hacia el

centro y sobre él, la pulpa espesa es barrida por brazos mecánicos llamados rastras, soportados desde el eje central del espesador. La periferia superior del espesador posee un canal exterior concéntrico que recibe el flujo de agua y se llama rebalse. La Figura 1 muestra el esquema de un espesador continuo y se indican las principales variables.

la operación de un espesador consiste en conseguir un estado estacionario con determinada concentración de descarga y profundidad de aguas claras. Para el buen funcionamiento de un espesador se requiere el conocimiento y control de las variables que afectan la operación.

El significado de las variables en la Figura 1 es:

- A : Flujo másico de sólido en la alimentación
- ϕ_A : Fracción volumétrica de sólido en la alimentación
- ϕ_D : Fracción volumétrica de sólido en la descarga
- Q_D : Flujo volumétrico de sólido en la descarga
- q_f : Flujo volumétrico de floculantes
- h : Altura de la pulpa en consolidación en el espesador
- Cs: Características del sólido
- f_A : Frecuencia de tamaño de la partícula en la alimentación
- a : Profundidad de agua clara

Las ecuaciones fundamentales que representan una suspensión en sedimentación son (1):

a. Ecuación de conservación de masa para el sólido,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi v_s) = 0 \quad (1)$$

b. Ecuación de conservación de masa para el fluido,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-\phi)v_f) = 0 \quad (2)$$

c. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento para el sólido,

$$\rho_s \phi v_s = -\nabla p_s + \rho_s \phi g - \mu K(\phi) u + F^c \quad (3)$$

d. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento para el fluido,

$$\rho_f (1-\phi) v_f = -\nabla p_f + \rho_f (1-\phi) g + \mu K(\phi) u - F^c \quad (4)$$

donde ϕ_s , v_s , p_s , ρ_s y v_s son la fracción volumétrica, la velocidad, la presión, la densidad y la derivada material con respecto a la velocidad del sólido; v_f , p_f , ρ_f , μ y v_f son la velocidad, presión, densidad, viscosidad y derivada material con respecto a la velocidad relativa sólido-fluido; $k(\phi)$ es el coeficiente de resistencia de la suspensión; g es la aceleración de la gravedad y F^e es la fuerza de interacción en el equilibrio.

$$v_s = D_s v_s / Dt = \partial v_s / \partial t + v_s \cdot \nabla s$$

para flujo vertical es posible combinar estas ecuaciones y reducirlas a las siguientes:

$$\partial \phi / \partial t + \partial (\phi v_s) / \partial z = 0 \quad (5)$$

$$\partial q_z / \partial t = 0 \quad (6)$$

$$q_z = \phi v_s + (1 - \phi) v_f \quad (7)$$

$$\rho_s \phi v_s = -\nabla p_s - \Delta \rho \phi g - \mu K(\phi) u \quad (8)$$

Donde z es la coordenada vertical, q_z es la velocidad volumétrica y $\Delta \rho$ la diferencia de densidades entre el sólido y el fluido.

TEORÍA DE KINCH

La teoría de Kinch (2) es un modelo idealizado de la sedimentación de una suspensión, donde se desprecia las fuerzas inerciales ($\rho_s \phi v_s$) y las de presión del sólido (∇p_s). Estas suposiciones limitan la validez de la teoría para suspensiones incompresibles, sedimentando muy lentamente. En estas condiciones la sedimentación batch se puede representar mediante las expresiones:

$$\partial \phi / \partial t + \partial (\phi v_s) / \partial z = 0 \quad (9)$$

$$-\Delta \rho \phi g - \mu K(\phi) u = 0 \quad (10)$$

con $q_z = 0$; $v_s = (1 - \phi) u$

cuando se aplica la sedimentación a pulpas floculadas no se puede mantener la incompresibilidad, por lo que las fuerzas de presión (∇p_s) debe conservarse en el balance de momentum del sólido. Adorjan (2) introduce la suposición que la presión del sólido es una función única de la concentración de la suspensión, la que debe ser determinada experimentalmente.

Becker (2) propone la siguiente expresión:

$$p_s(\phi) = a \phi^b \quad \text{para } \phi > 0 \quad (11)$$

Donde a y b son parámetros experimentales determinables mediante una celda de compresibilidad.

Suponiendo que la fuerza inercial de los sólidos es despreciable (movimientos lentos) y al proyectar la ecuación (8) en la dirección z antigravitatoria se tiene:

$$-\partial p_s / \partial z + \Delta \rho \phi (-g) - \mu K(\phi) u_z = 0 \quad (12)$$

reordenándola se obtiene:

$$\Delta \rho \phi g = - \partial p_s / \partial z - \mu K(\phi) u_z \quad (13)$$

METODO DE DISEÑO DE ESPESADORES

El diseño de un espesador consiste en elegir el diámetro de estanque que es capaz de tratar A (Ton/día) de sólido a concentraciones ϕ_A produciendo una descarga de concentración.

METODO DE ANDORJAN (3)

Al espesar una pulpa desde una fracción volumétrica de sólido ϕ hasta una fracción volumétrica de descarga ϕ_d , con un flujo volumétrico de sólido Q_s , la velocidad volumétrica con que se elimina agua de la pulpa es:

$$Q_A = Q_s [1/\phi - 1/\phi_d] \quad (14)$$

Así la velocidad relativa sólido- fluido es:

$$u_z = \frac{Q_s}{s} \frac{(1/\phi - 1/\phi_d)}{(1 - \phi)} \quad (15)$$

Experimentalmente se ha determinado que el coeficiente de resistencia $K(\phi)$ es de la forma:

$$K(\phi) = \frac{\Delta \rho \phi g}{\mu u_w (1-\phi)^N} \quad (16)$$

Donde,

u_w : Velocidad terminal de sedimentación dada por la ley de Stokes para la suspensión.

Reemplazando las ecuaciones (15) y (16) en (13) se obtiene:

$$\Delta\rho\phi g = - \frac{\partial p_s}{\partial z} + \frac{\Delta\rho\phi g}{u_w(1-\phi)^N} \frac{Q_s}{S} \frac{(1/\phi - 1/\phi_D)}{(1-\phi)} \quad (17)$$

La condición crítica ocurre en alguna capa de fracción volumétrica de sólidos del espesor cuando el peso neto de sólido en aquella capa es igual a la fuerza debido al flujo viscoso sobre la misma capa, es decir $\partial p_s / \partial z = 0$.

Por lo tanto el área del espesor es:

$$S = \frac{Q_s}{v(\phi)} [1/\phi - 1/\phi_D] \quad (18)$$

Andorjan define un parámetro λ ($0 < \lambda > 1$) que denomina "factor de carga" y que transforma la ecuación (18) en la siguiente:

$$S = \frac{Q_s}{v(\phi)\lambda} [1/\phi - 1/\phi_D] \quad (19)$$

El factor de carga debe elegirse de modo que las fluctuaciones en la velocidad de alimentación no creen condiciones críticas en el espesador. La fracción volumétrica limitante de sólidos, ϕ_L , se puede determinar derivando la ecuación (19), e igualando a cero:

$$\phi_L = \frac{N+2}{2(N+1)} \phi_D \pm \left| \left(\frac{N+2}{2(N+1)} \phi_D \right)^2 - \frac{\phi_D}{N+1} \right|^{1/2} \quad (20)$$

Con signo negativo se obtiene la concentración requerida para el área mínima.

Si el discriminante D en la ecuación (2) es negativo o cero existe mínimo:

$$D = \left(\frac{N+2}{2(n+1)} \phi_D \right)^2 - \frac{\phi_D}{N+1} \quad (21)$$

Altura de la pulpa en el espesador

Diferenciando la formula empírica para la presión de sólidos dada pro la ecuación (11) se tiene:

$$\partial p_s / \partial z = abe^{b\phi} (\partial \phi / \partial z) \quad (22)$$

Reemplazando (22) en (17) se tiene:

$$\Delta \rho \phi g = -abe^{b\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\Delta \rho \phi g}{u_s} \frac{Q_s}{S} \left(\frac{1/\phi - 1/\phi_0}{(1-\phi)^{n+1}} \right)$$

de donde:

$$\frac{\partial z}{\partial \phi} = \frac{abe^{b\phi}}{\Delta \rho \phi g \left[\frac{Q_s}{v(\phi)S} (1/\phi - 1/\phi_0) - 1 \right]}$$

$$\frac{\partial z}{\partial \phi} = \frac{abe^{b\phi}}{\Delta \rho \phi g (1 - \lambda)} = f(\phi) \quad (23)$$

$$\partial z / \partial \phi = 0, \phi < \phi_c$$

ϕ_c : Fracción volumétrica de sólido después de la cual p_s comienza a existir.

La ecuación (23) da la relación entre la concentración de sólidos y la altura de la pulpa en el espesador.

Para determinar la altura de la pulpa a diferente concentración se plantea la siguiente ecuación:

$$Y_{j+1} = Y_j - 1/8 \Delta \phi (K_1 + 3K_2 + 3K_3 + K_4) \quad (24)$$

Que resuelve usando el método de Runge-Kutta de cuarto orden, en el cual se calculan los siguientes valores para un incremento $\Delta \phi$ de la fracción volumétrica de sólidos:

$$\begin{aligned} K_1 &= F(\phi_j) \\ K_2 &= F(\phi_j + \frac{1}{2}\Delta\phi) \\ K_3 &= F(\phi_j + \frac{2}{3}\Delta\phi) \\ K_4 &= F(\phi_j + \Delta\phi) \end{aligned}$$

$\Delta\phi$ = Intervalo entre dos puntos de ϕ
 Y_j = Altura en cualquier punto medido del espesador.

METODO DE COE_CLEVENGER (3)

Coe y Clevenger postularon dos regímenes de sedimentación:

El primero, partículas que sedimentan sin ningún soporte mecánico generado por las partículas ubicadas en niveles inferiores, donde el peso del sólido se sostiene por reacción con el fluido. ellos denominaron tal comportamiento como "sedimentación libre".

El segundo régimen, es aquel en que las partículas se tocan bastante entre ellas y fuerzas de soporte se transmiten a través del contacto interpartícula. Por lo tanto, capas de sólidos ejercen una compresión a medida que las partículas se van al fondo, su peso se sustenta hidráulicamente desapareciendo esta componente cuando el asentamiento es completo.

El método requiere efectuar una serie de experiencias discontinuas partiendo de diferentes fracciones volumétricas de sólidos comprendidas entre la alimentación y la descarga, determinando así, el área necesaria de la unidad de flujo para sedimentar una suspensión de fracción volumétrica de sólidos ϕ_L (fracción limitante). Esta área se denomina "área unitaria" y se le designa por AU. Coe y Clevenger determinaron el Area unitaria de distintas concentraciones y usaron en el diseño la mayor área obtenida.

$$AU = \frac{1}{\rho_s V_s} [1/\phi_L - 1/\phi_D] \quad (24)$$

La altura de la zona de compresión según Coe y Clevenger está dada por:

$$AU = \frac{4t}{\rho_s V_s} [1/\phi_L - \phi_D] \quad (25)$$

La altura de la zona de compresión según Coe y Clevenger está dada por:

$$H_{zc} = \frac{\xi t (\rho_s - \rho_f)}{3\rho_s AU (\rho' - \rho_f)} \quad (26)$$

Donde,

t : Tiempo máximo de compresión
 ρ' : Gravedad específica promedio de la pulpa de compresión.

ESPEZAMIENTO CONTINUO EN ESTADO ESTACIONARIO

De acuerdo a la teoría anterior, las ecuaciones fundamentales de sedimentación unidimensional continua (4) son:

$$\partial\phi/\partial t + \partial(\phi v_s)/\partial z = 0 \quad (27)$$

$$q = v_s - (1-\phi)u \quad (28)$$

$$\rho_s \phi \partial v_s / \partial t + \rho \phi v_s / \partial z = - 1/K(\phi) \partial\phi/\partial z - \Delta\rho\phi g - \mu K(\phi)u \quad (29)$$

La ecuación (29) tiene dos parámetros característicos $k(\phi)$ y $K(\phi)$ que representan la compresibilidad y el coeficiente de resistencia respectivamente. El parámetros pueden determinarse en condiciones extremas de movimiento. Es posible encontrar el valor del parámetro $K(\phi)$ permitiendo que la suspensión sedimente lentamente y a velocidad constante. De (29) se deduce entonces que:

$$K(\phi) = \frac{\Delta\rho\phi g}{\mu u(\phi)} \quad (30)$$

Y como $u(\phi)$ se puede expresar en términos de la ecuación de Richardson y Zaki:

$$u(\phi) = u_n (1 - \phi)^{n+1} \quad (31)$$

Donde, u_n y $n+1$ son parámetros experimentales, la expresión (30) se transforma en:

$$k(\phi) = \frac{\Delta\rho\phi g}{\mu u_n (1-\phi)^{n+1}} \quad (32)$$

el parámetro $k(\phi)$ se puede determinar de experiencias en el equilibrio; en esta situación no hay movimiento relativo entre el sólido y el fluido y por tanto u es cero en (29).

Existe un equipo especializado para determinar este parámetro que se denomina celda de compresión. La siguiente relación ha sido obtenida experimentalmente por Becker (4) para $k(\phi)$:

$$k(\phi) = (1/ab)e^{-b\phi} \quad (33)$$

Los parámetros a y b son determinados experimentalmente en el celda de compresibilidad.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de un espesador en régimen estacionario se pueden deducir de (27) a (29) eliminando las derivadas temporales y usando el valor de $K(\phi)$ dado por (30):

$$\rho_s \phi v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} = - \frac{1}{k(\phi)} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \Delta \rho \phi g - \frac{\Delta \rho \phi g}{u_w (1-\phi)^n} (v_s - q) \quad (35)$$

La ecuación (34) indica por una parte, que la velocidad volumétrica del sólido es constante, y por otra que:

$$dv_s/\partial z = - v_s/\phi \partial \phi/\partial z \quad (36)$$

Debido a que el espesador está en régimen estacionario, la velocidad volumétrica q es constante y corresponde a la velocidad volumétrica de descarga. Denominando A el flujo másico de alimentación se puede escribir:

$$v_s(\phi) = \frac{A}{\rho_s \phi S}; \quad q = \frac{A}{\rho_s \phi_0 S} \quad (37)$$

Donde S es el área del espesador.

por lo anterior, la ecuación (35) se transforma en:

$$\frac{A^2}{\rho_s \phi^2 S^2} \frac{\partial \phi}{\partial z} = abe^{b\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} + \Delta \rho \phi g - \frac{\Delta \rho \phi g A}{u_w (1-\phi)^n \rho_s S} [1/\phi - 1/\phi_0] \quad (38)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\mu_s \Delta \rho \phi^3 g (S/A)^2}{1 - \rho_s (S/A)^2 \phi^2 abe^{b\phi}} [1 - \frac{\Delta \rho \phi g}{(S/A) u_w (1-\phi)^n} (1/\phi - 1/\phi_0)] \quad (39)$$

La ecuación (39) es un modelo matemático para el espesamiento continuo estacionario, que permite diseñar y simular un espesador.

Para la ecuación (39) existe una restricción que se basa en observaciones experimentales.

La fracción de sólidos siempre aumenta hacia el fondo del espesador:

$$\partial\phi/\partial z \leq 0 \quad (40)$$

Por lo tanto, la expresión (39) queda

$$\frac{\Delta\rho\phi g}{1 - \rho_s(S/A)^2\phi^2 abe^{b\phi}} \left[1 - \frac{\Delta\rho\phi g}{(S/A)u_s(1-\phi)^n} (1/\phi - 1/\phi_0) \right] \leq 0 \quad (41)$$

La anterior desigualdad se cumple si:

$$\frac{\Delta\rho\phi g}{(S/A)u_s(1-\phi)^n} (1/\phi - 1/\phi_0) \geq 0 \quad (42)$$

Y

$$1 - \rho_s(S/A)^2\phi^2 abe^{b\phi} \leq 0 \quad (43)$$

De donde se deduce que:

$$S/A \geq \frac{\Delta\rho\phi g}{u_s(1-\phi)^n} (1/\phi - 1/\phi_0) \quad (44)$$

$$S/A \geq \frac{e^{-b\phi}}{\rho_s ab\phi^2} \quad (45)$$

La primera restricción conduce a los métodos de diseño de Coe y Clevenger cuando se use la igualdad ($\phi = \phi_A$) y al método de Andorjan cuando se usa la desigualdad.

La segunda restricción implica que las fuerzas de inercia deben ser mayores que las fuerzas de presión. Esta restricción entra en juego para altas velocidades de sedimentación.

Definiendo las áreas unitarias AU , AU_0 y AU_1 en la forma:

$$AU = S/A$$

$$UA_0 = \frac{1}{\rho_s u_w (1-\phi)^n} (1/\phi - 1/\phi_0) \quad (46)$$

$$AU_1 = \frac{e^{-b\phi}}{\rho_s ab\phi^2} \quad (47)$$

Se obtiene de la ecuación (44) y (45) la siguiente restricción para el diseño de espesadores:

$$AU \geq \text{máx} (AU_0, AU_1) \quad (48)$$

Introduciendo el factor de carga $\lambda > 1$, se puede escribir:

$$S/A = \lambda \text{máx} (AU_0, AU_1) \quad (49)$$

La ecuación (49) permite calcular el área unitaria para una pulpa en experimento.

La altura que tendría la pulpa en consolidación se puede calcular a través de una integración numérica de la ecuación (38); el resultado se expresa en la forma:

$$H = f(\phi_0, AU) \quad (50)$$

De la altura total de un espesador, aproximadamente el 25% se reserva para cubrir las zonas de agua clara, distribución de alimentación y sedimentación libre. Esto significa que la altura H en la ecuación (50) corresponde sólo un 75% de la altura total del espesador.

DESCRIPCION DEL MODELO COMPUTARIZADO

el sistema de diseño y simulación (5,6) de espesadores está manejado totalmente por un programa de control escrito en CPL llamado DISIMU.CPL. El sistema se basa en un menú, el cual es controlado por el programa PROY que toma la opción digitada por el usuario y graba en el archivo METODO

el programa DISIMU.CPL toma la opción del archivo METODO para encadenar automáticamente los comandos primos necesarios, con el fin de realizar adecuadamente la función asociada a la opción digitada en el menú; una vez realizada la función, el control retorna a ejecutar nuevamente el menú para escoger una nueva opción.

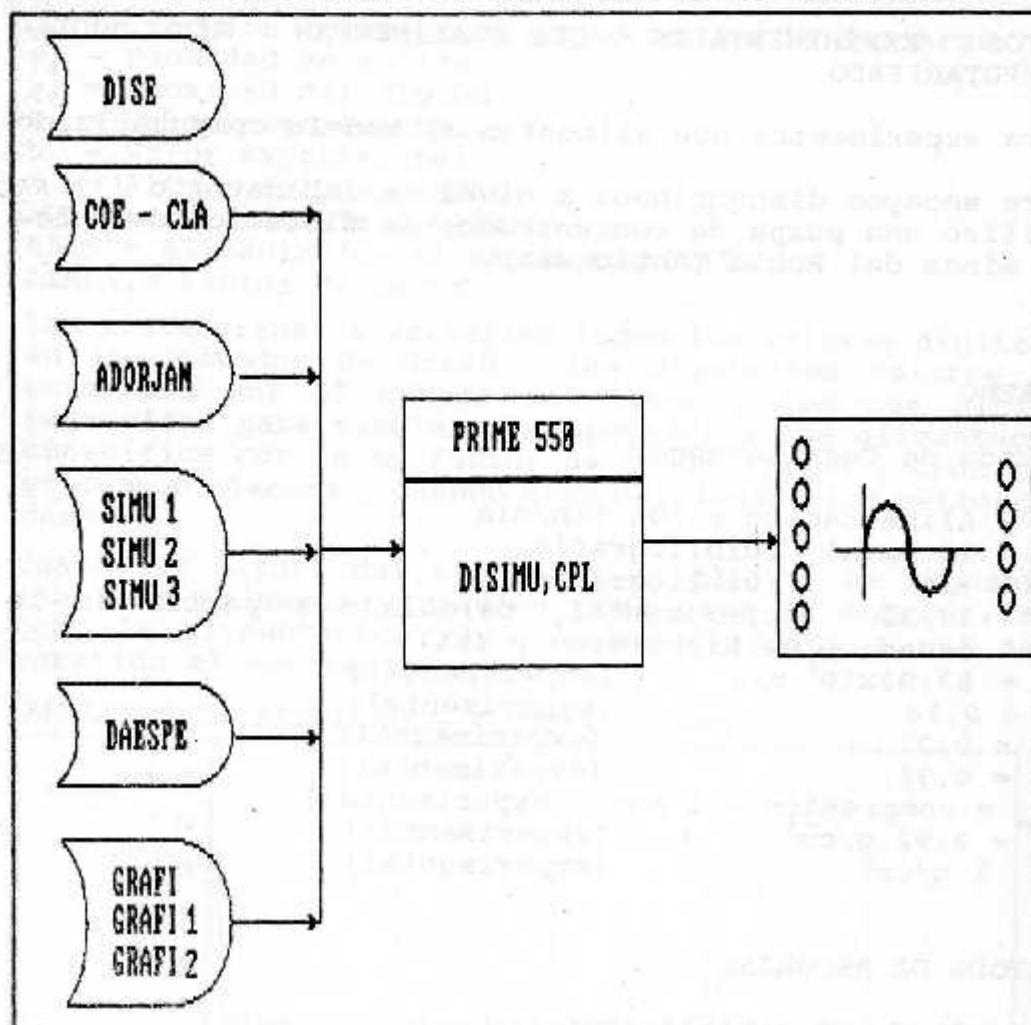


Figura 2. Diagrama de pasada del programa DISIMU.CPL.

El programa en descripción (DISIMU.CPL) consta de cinco módulos que corresponden a tres opciones del menú más dos módulos invocados por el programa DISIMU.CPL. La Figura 2 describe el diagrama de pasada del programa DISIMU.CPL.

El sistema de diseño y simulación consta de doce programas Fortran llamados PROY, COE-CLA, ANDORJAN, DISEN, SIMU1, SIMU2, SIMU3, BUSCA, GRAFI, GRAFI1, GRAFI2.

El programa que exhibe los resultados en la terminal (pantalla) lo hace el programa BUSCA.

Los diagramas de bloques de los programas en la terminal (Pantalla) lo hace el programa BUSCA

DATOS EXPERIMENTALES QUE ALIMENTAN AL MODELO COMPUTARIZADO

Para experimentos que alimentan al modelo computarizado para ensayos discontinuos a nivel de laboratorio (7) se utilizó una pulpa de concentrados de flotación de cobre de minas del Roble (Antioquia).

DISEÑO

Método de Coe-Clevenger

A = Alimentación = 305 Ton/día
a = 24 Nm.m² (bibliografía)
b = -14 (bibliografía)
n = 14,25 (experimental, calculado a partir de la ecuación de Richardson y Zki)
 $u_w = 63,93 \times 10^3$ m/s (experimental)
 $\phi_A = 0,14$ (experimental)
 $\phi_C = 0,21$ (experimental)
 $\phi_D = 0,34$ (experimental)
 t_{max} = compresión = 1 hora (experimental)
 $\rho_s = 2,92$ g/cm³ (experimental)
 $\rho_f = 1$ g/cm³ (experimental)

METODO DE ANDORJAN

a = 24 Nm.m² (bibliografía)
b = -14 (bibliografía)
N = -15,25 (experimental)
 $u_w = 63,93 \times 10^3$ m/s (experimental)
A = 305 Ton/día
 $v_s = 0,2$ cm/s (experimental)
 $\phi_A = 0,14$ (experimental)
 $\phi_C = 0,21$ (experimental)
 $\phi_D = 0,34$ (experimental)

SIMULACION

Para su desarrollo se requiere de los siguientes datos de entrada:

- ϕ_c = Fracción volumétrica de sólido crítica
- ϕ_A = Fracción volumétrica de sólido en la alimentación
- ϕ_D = Fracción volumétrica de sólido en la descarga
- ρ_s = Densidad de sólido
- ρ_f = Densidad del fluido
- a = Valor experimental
- b = Valor experimental
- z = Altura del espesador
- AU = Area unitaria [$m^2/(TPD)$]
- ALIM = Alimentación al espesador [TPD]
- LAMDA = Factor de carga

Las siete primeras variables toman los valores digitados en los métodos de diseño, los siguientes valores son generados por el método de diseño y los dos últimas requeridas para simular el espesador a una alimentación específica con la su factor de carga (lamda), todo este se cumple siempre y cuando sean utilizados los métodos de diseño.

Cuando la altura del espesador se digita, se requieren las ocho primeras variables como dato de entrada, así como la alimentación y el factor de carga a que será sometido el espesador.

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

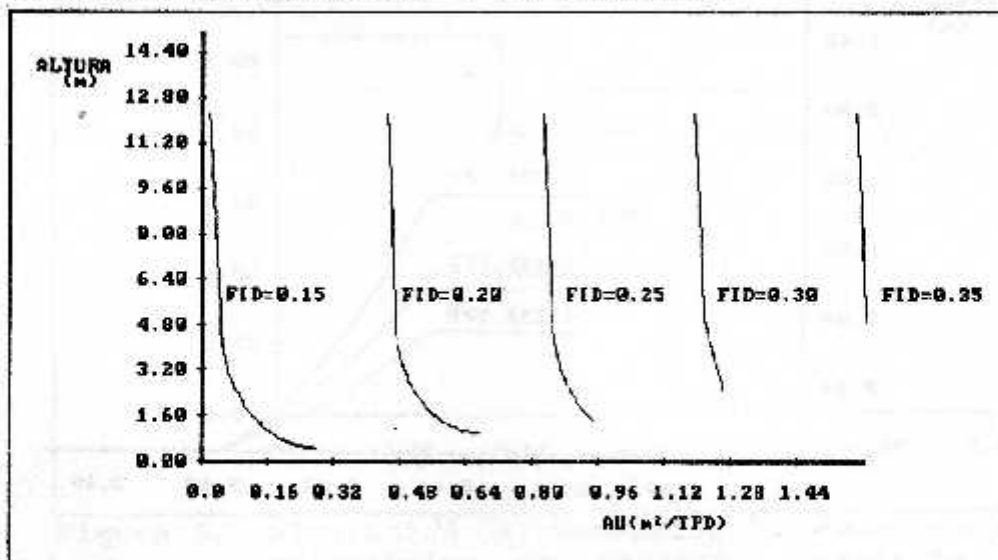


Figura 3. Altura de pulpa en consolidación de sistemas de espesadores en función del área unitaria.

La Figura 3 se presentan los resultados obtenidos en el diseño de espesadores; cada curva representa las alternativas de diseño (AU, H) para una concentración de descarga determinada. El área unitaria obtenida con la asíntota vertical de las curvas corresponde al área unitaria de Coe y Clevenger (AU_c). De lo anterior se puede concluir que no existe una única solución para el diseño de una unidad de espesamiento, y que por lo tanto se requiere de un análisis para la selección del tamaño de los espesadores.

Para la selección de los equipos apropiados para una determinada pulpa se debe tener en cuenta:

1. La geometría de los espesadores ofrecidos por la industria. En el programa se utilizaron espesadores Doorr - Oliver.
2. Que la capacidad máxima exigida por el problema a la máxima fracción volumétrica de descarga deseada, se pueda tratar con el equipo escogido trabajando al límite de su capacidad.
3. Un espesador trabajando al límite de su capacidad es muy sensible al aumento de tonelaje, lo cual puede fácilmente producir sólidos en el rebalse.

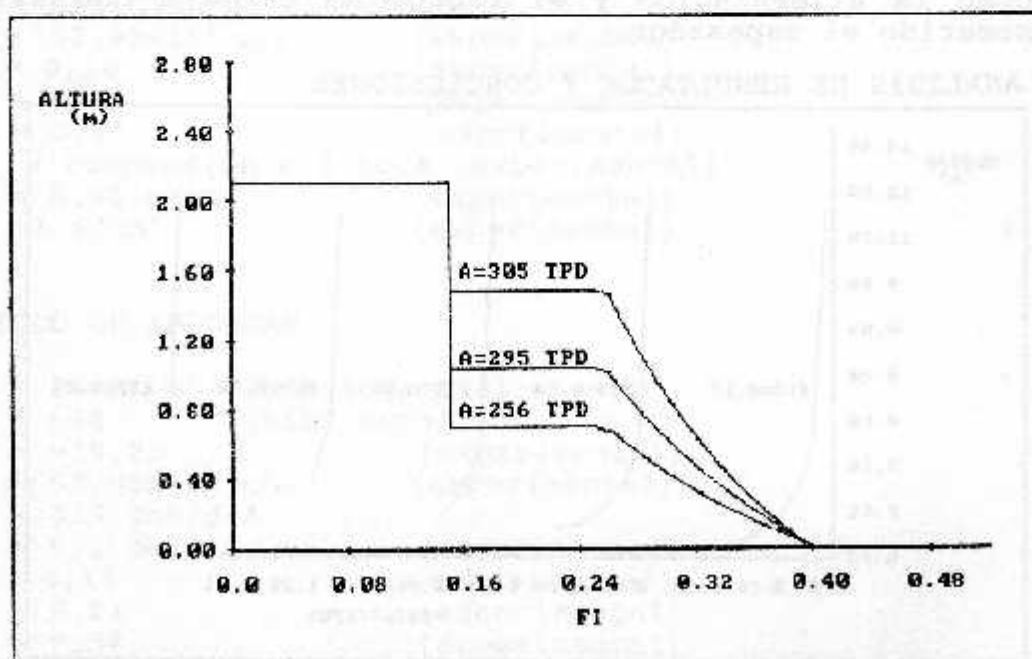


Figura 4. Simulación del espesador diseñado para diferentes flujos de alimentación.

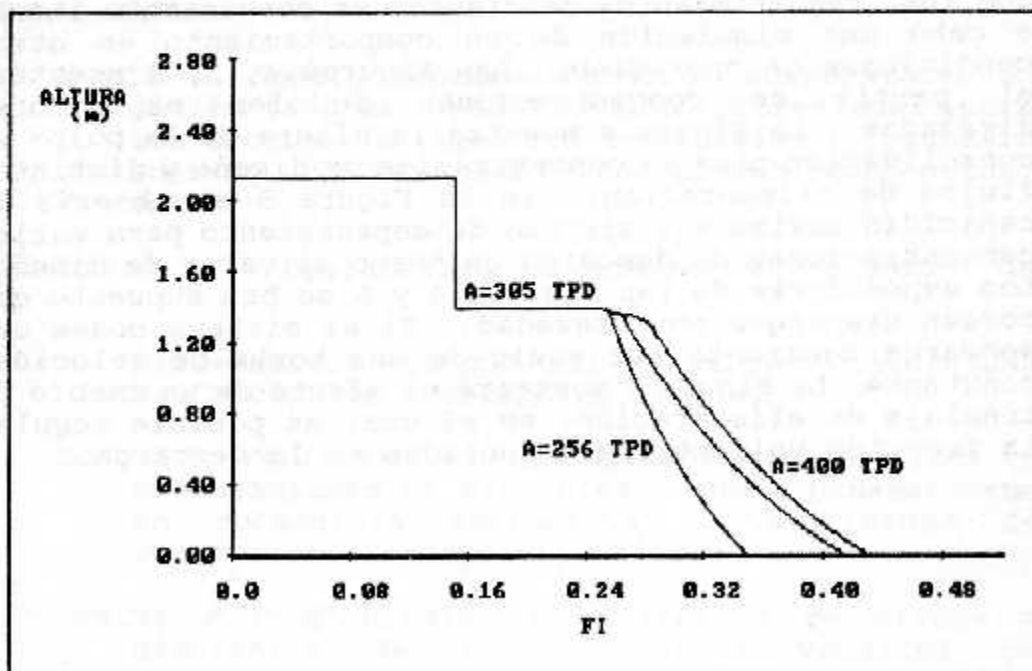


Figura 5. Simulación del flujo máximo permisible del espesador diseñado para diferentes concentraciones de carga.

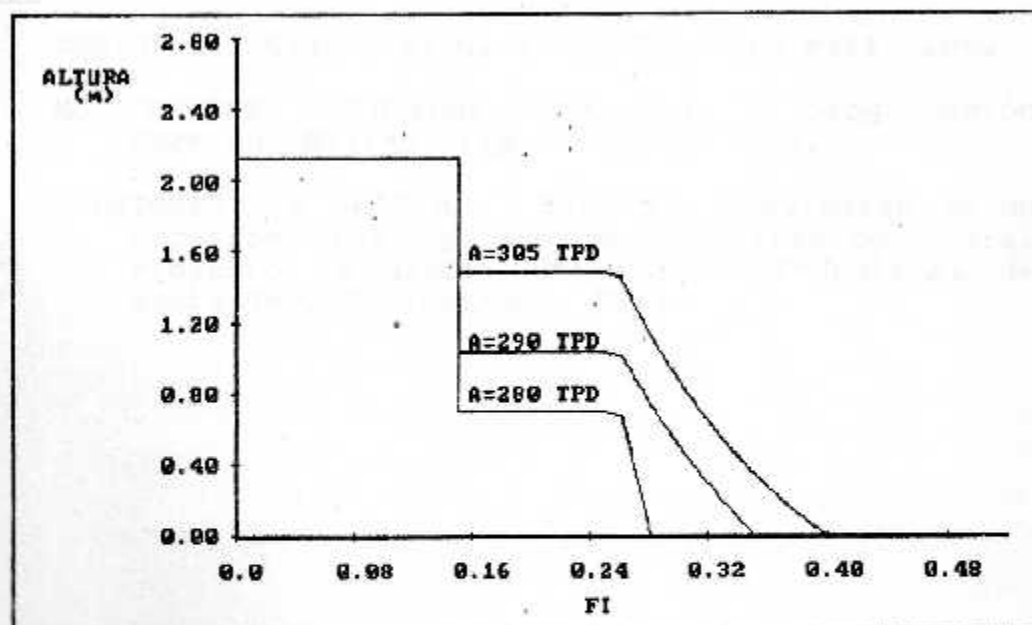


Figura 6. Simulación del espesador diseñado con flujo volumétrico de descarga constante para diferentes flujos de alimentación.

Seleccionando el tamaño de los espesadores que cumplen con los requerimientos de diseño, es conveniente llevar a cabo una simulación de su comportamiento en otras condiciones de operación. Las Figuras 4, 5, 6 muestran el perfil de concentraciones de los espesadores diseñados. La Figura 4 muestra la altura de la pulpa en consolidación para la concentración de diseño y distintos flujos de alimentación. en la Figura 5 se observa la capacidad máxima del sistema de espesamiento para varias concentraciones de descarga en torno al valor de diseño. Los espesadores de las Figuras 4 y 5 se han supuesto que poseen descargas por gravedad. Si el sistema posee una descarga constante por medio de una bomba de velocidad constante, La Figura 6 mostrará el efecto de un cambio de tonelaje de alimentación, en el cual es posible regular la fracción volumétrica de sólidos en la descarga.



Figura 4. Simulación del espesador diseñado con flujos de alimentación distintos a la concentración de diseño.

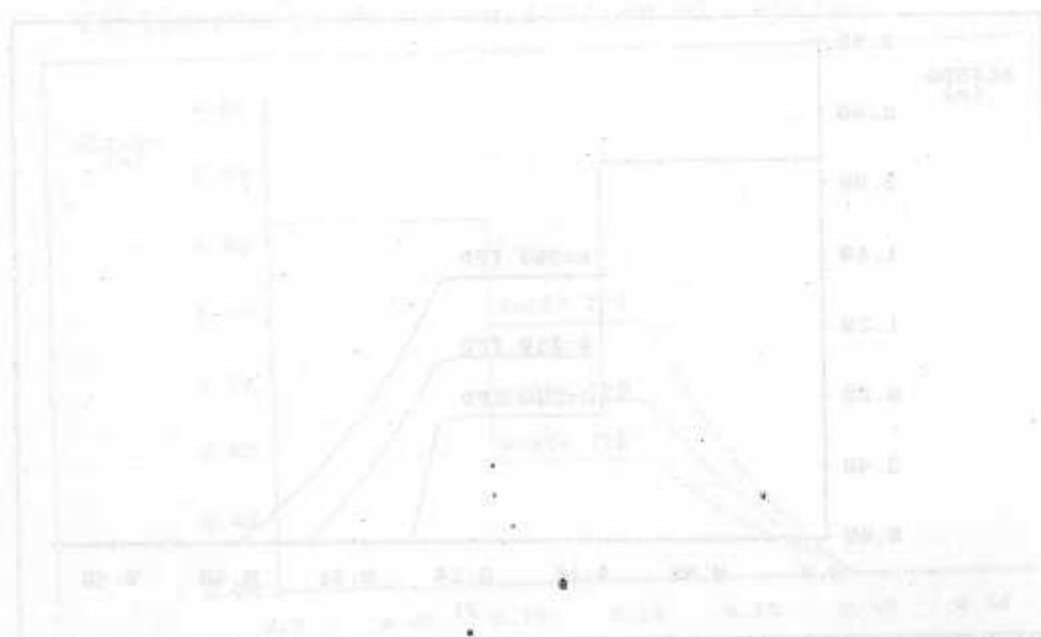


Figura 5. Simulación del espesador diseñado con flujos de alimentación constante y descargas de distintas concentraciones.

BIBLIOGRAFIA

1. BASCUR O. Modelo fenomenológico de suspensiones en sedimentadores. Habilitación profesional para los títulos de Ingeniero Metalúrgico e Ingeniero Químico. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
2. CONCHA F. Operaciones mecánicas en plantas de procesamiento de mineral de cobre. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
3. CONCLA F. Conferencia sobre operaciones mecánicas en procesamiento de minerales. Curso panamericano en metalurgia extractiva. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
4. CONCHA F y BARRIENTOS A. Criterios de diseño y simulación de espesadores. Universidad de concepción, Concepción, Chile. Trabajo presentado en el I encuentro Latinoamericano de metalurgia. Cartagena, Septiembre 12, 13, 14 de 1983.
5. GORDON G. System simulation. Prentice Hall. 1980.
6. MC CRACKEN D. Métodos numéricos y programación Fortran. Méjico, Limusa-Wiley, 1978.
7. RODRIGUEZ J y RUIZ M. Diseño y simulación de un espesador para pulpas de minerales de cobre. Proyecto de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1985.