

3.1. Introducción

Las pulpas son mezclas de sólidos y líquidos en forma de suspensiones de tal forma que sus características y comportamiento se pueden estudiar, en lo que a minería se refiere, como un fluido homogéneo. Es un fluido formado por la suspensión de uno o varios minerales en agua.

En la industria se obtienen pulpas con diferentes procesos, procedimientos y composiciones¹, pero en minería, salvo excepciones puntuales (Ej.: uso de aceites para extracción), se usa el agua por su disponibilidad, coste y características físico-químicas de densidad, estabilidad, etc.

Las pulpas se identifican industrialmente por parámetros como la densidad, viscosidad, capacidad abrasiva, etc.; pero el más relevante es la densidad media de la pulpa y esta, bajo la consideración de utilizar agua como fluido principal, tendrá los márgenes siguientes:

- Densidad del líquido (agua): 1 kg/l (t/m^3).
- Densidad de los sólidos (minerales o rocas)²: entre 1,6 y 9.
- Densidad media de las pulpas: Intermedia entre la del agua y la del sólido en suspensión, está en el rango de 1,5 y 4,5 t/m^3 .
- Los límites son 1 para el valor inferior y el correspondiente al mineral como límite superior.

Como ejemplo y para el caso del carbón se utilizan densidades de pulpa en el rango de 1,3 – 2,2 (Las menas minerales son más densas que la ganga normalmente, pero en el caso del carbón, la pizarra, ganga, es más densa que el carbón).

La densidad es una característica intrínseca de los cuerpos homogéneos, propia del cuerpo o fluido analizado, y es independiente de la cantidad.

El tamaño de las partículas en suspensión es muy variable según el proceso pero se puede dar la referencia en el entorno de las 150 μm para el grano máximo y normalmente un tamaño menor de 75 μm .

Denominación	Fórmula	Densidad (kg/l)
Carnalita	KMgCl3	1,6
Bauxita	Roca terrosa	2,0 – 2,55
Salitre	KNO3	2,1
Yeso	CaSO4	2,3
Calcita	CaCO3	2,72
Cuarzo	SiO2	2,65
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2,7 – 2,8
Dolomita	CaMg(CO3)2	2,8 – 2,9
Ofita	Roca	3,1
Magnesita	MgCO3	3,0 – 3,2
Fluorita	CaF2	3,2
Esfalerita	ZnS	3,9 – 4,1

¹ Industria conservera: Fruta fresca, una vez deshuesada y triturada. Industria azucarera: Residuo de la remolacha después de extraer el jugo azucarado, y que sirve normalmente para piensos.

² Algunos minerales tienen densidades de 14 o incluso 19 kg/l como es el caso de algunas menas de oro o platino.

Blenda	ZnS	4,0
Calcopirita	CuFeS	4,1 – 4,3
Pirita	FeS ₂	4,9 – 5,2
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,18
Galena	PbS	7,4 – 7,6
Hierro	Fe	7,3 – 7,9
Cinabrio	HgS	8,0 – 8,2
Cobre	Nativo	8,9
Platino	Pt	19,0
Oro	Au	19,3

Tabla 3.1. Valores de referencia³, densidades, de algunos minerales y rocas.

3.2. Utilización minera de las pulpas

De gran importancia en los procesos mineralúrgicos, se citan los procedimientos siguientes:

- *Procesos mineralúrgicos*: Molienda en húmedo, clasificación, concentración gravimétrica, flotación, CMD⁴, etc.
- *Transporte*: En las instalaciones mineras entre procesos diferentes y como método de transporte (*).
- *Almacenamiento*: Tanques intermedios en procesos.
- *Otras industrias*: Siderurgia, metalurgia, alimentación, tratamiento de residuos, depuración de efluentes, etc.

(*). Ref. *Industria Minera; sep-1995*.

Construcción del mayor carbotructo del mundo en China. Custom Coal-EEUU y MRI-Austria, construirán un carbotructo subterráneo de las características siguientes:

- Longitud: 800 Km
- Coste: 890 M\$ → 720 M€
- Sustituye: Transporte por ferrocarril.
- Capacidad: 15 Mt/año
- Caudal medio: 1.712 t/h → 86 camiones/h de 20 t/Ud.

Dado la consideración de que una pulpa no es una disolución, sino una suspensión de sólidos en líquidos, donde cada uno de los elementos está claramente diferenciado, hay que considerar el fenómeno del desplazamiento de los sólidos dentro del líquido, especialmente cuando las turbulencias son bajas o no existen; fenómeno que produce acumulaciones puntuales de sólidos y que pueden dificultar las operaciones de transporte o almacenamiento.

A este respecto en los tanques se deben disponer elementos de agitación para mantener las características que interesen según el proceso.

³ Manual de Mineralogía de Dana, Hurlber y Klein. Tecnología de Procesamiento de Minerales, B.A.Wills. Guía de Minerales y Rocas. Annibale Mottana, y otros. Ed. Grijalbo. 1977.

⁴ CMD: Concentración con medios densos.

3.3. Elementos de las pulpas

Se dan en el cuadro adjunto los componentes principales para una pulpa formada por un líquido y un sólido.

Elemento	Volumen (l)	Peso (kg)	Densidad (kg/l) ó (t/m ³)	Caso particular V _(pulpa) = 1; liq: agua
Pulpa	V	P	d	d = P
Líquido	V _l	P _l	d _l	d _l = 1; V _l = P _l
Sólido	V _s	P _s	d _s	d _s = P _s / V _s

Tabla 3.2. Pulpas: Definición de parámetros.

Con las relaciones básicas siguientes:

$$P = V \times d ; \text{definición de densidad.}$$

$$P = P_l + P_s ; \text{conservación de las masas en el proceso.}$$

$$V = V_l + V_s ;$$

No existe interacción física molecular ni huecos, mezcla homogénea y continua.

Las relaciones básicas particularizadas para el caso de V_(pulpa) = 1 litro y elemento básico el agua son: P = d ; P_l = V_l; 1 = V_l + V_s ;

La densidad se obtiene pesando en el laboratorio un volumen de pulpa conocido o mediante el densímetro, equipo que se introducen en la pulpa y da directamente el valor.

3.4. Parámetros características de las pulpas. Definiciones

Se definen los parámetros principales, sus expresiones en función de los elementos básicos de las pulpas y las relaciones inmediatas, siguientes:

Sp: *Fracción de sólidos en peso*, que corresponde al tanto por uno de sólidos en la pulpa y se formula por la relación del peso de los sólidos que contiene respecto al peso total de la pulpa (sólido más líquido).

$$Sp = P_s / P ; \quad Sp = P_s / (P_s + P_l).$$

La expresión anterior, particularizada para el caso V=1, se obtiene la relación P_s = Sp·d, y la cantidad total de sólido para un volumen o caudal de pulpa dado por Q(m³/h) se obtiene por la expresión:

$$P_s \text{ (total en t/h)} = Q \cdot Sp \cdot d$$

Técnica: Ensayo para la obtención del valor de Sp en el laboratorio

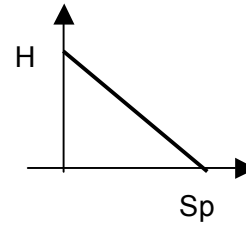
El parámetro Sp se obtiene tomando una muestra de un volumen V conocido (V ≈ 1) y después de pesada (obtener el valor de P), la muestra se introduce en una estufa a temperatura controlada. Mediante evaporación, a una temperatura de 104°-105°C, se obtiene un resto sólido que da directamente P_s, y se calcula Sp = P_s / P.

La temperatura no debe ser inferior a 101°-102°C, no se puede asegurar la evaporación de la totalidad del agua, ni superar los 105°C, se pueden producir reacciones o pérdidas del agua de constitución de los minerales y rocas.

H: *Humedad*, que es la relación del peso del líquido al peso total de la pulpa. Se formula por la relación: H = P_l / P.

Ambos parámetros cumplen la relación básica⁵:

$$SP + H = 1$$



D: Dilución, es la relación entre el peso del líquido y el peso del sólido. Se formula por la relación: $D = P_l / P_s$.

Otra definición para la dilución, de uso menos generalizado en minería, es la dada por:
 $D = 1.000 \cdot P_s / V = 1.000 \cdot P_s$, gramos de soluto por litro de pulpa.⁶

Por sustitución simple se obtiene la relación directa $D = (1 - Sp) / Sp$, y se observa en el gráfico que la dependencia no es lineal.

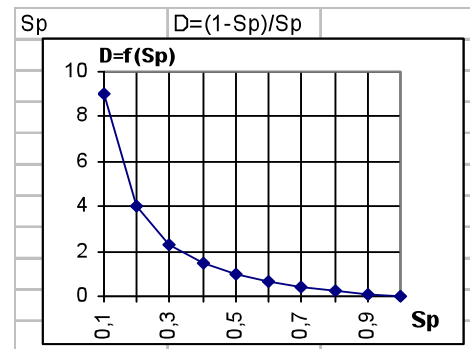
$$D = \frac{P_l}{P_s} = \frac{P - P_s}{P_s} = \frac{P}{P_s} - 1 = \frac{1}{Sp} - 1 = \frac{1 - Sp}{Sp} = D$$

Sv: Fracción de sólidos en volumen, que es la relación entre el volumen ocupado por los sólidos en suspensión en relación con el volumen total de pulpa.

$Sv = Vs / V$; para $V = 1$, $Sv = Vs$, y se da la relación: $Sv = Sp (d / d_s)$.

Por aplicación directa de las definiciones anteriores se obtiene para el caudal másico transportado en forma de pulpa, la relación siguiente:

$$Ps (t/periodo) = Q(m^3_{(pulpa)/h}) \cdot Sp \cdot d (t/m^3) \cdot T(h/periodo); \quad (Q_{(caudal\ de\ pulpa)} \cong V).$$



3.5. Relación entre parámetros y densidades; fórmulas derivadas

Aplicando a las definiciones anteriores las condiciones dadas por:

- Volumen de pulpa, 1 litro.
- Fluido utilizado agua, $d_1 = 1$.

Se obtienen las relaciones, entre otras, que se dan a continuación y que son de uso generalizado en los cálculos para el trabajo con pulpas en minería.

Partimos de la definición de densidad del sólido dada por $ds = Ps / Vs$,

$$ds = Ps / Vs;$$

sustituimos Ps por $Sp \cdot d$; condición $V = 1$ y Vs por su relación inmediata $V - V_1$

$$ds = Sp \cdot d / (V - V_1) = Sp \cdot d / (1 - V_1);$$

hacemos $V_1 = P_1$, por ser agua,

$$ds = Sp \cdot d / (1 - P_1);$$

hacemos la sustitución $P_1 = P - Ps$.

$$ds = Sp \cdot d / (1 - P + Ps);$$

⁵ Se verifica aplicando las definiciones directamente en la expresión.

⁶ En química se utiliza la definición $D_{química} = gr_soluto / L_disolvente$.

Sustituimos nuevamente P_s por $Sp \cdot d$; P por d , y se obtiene la relación siguiente:

$$ds = \frac{Sp \cdot d}{1 - d + Sp \cdot d};$$

Densidad del sólido en función de la densidad de la pulpa y de la proporción de sólidos en peso.
Unidades: Kg/l ó t/m³.

Reordenando términos y despejando se obtienen las relaciones que se dan a continuación:

$$Sp = \frac{(d - 1) \cdot ds}{d \cdot (ds - 1)};$$

Fracción de sólidos en peso en función de la densidad de la pulpa y de la densidad del sólido.
Unidad: Parámetro adimensional.

$$d = \frac{ds}{ds + Sp - Sp \cdot ds};$$

Densidad de la pulpa en función de la densidad del sólido y de la fracción de sólidos en peso.

$$d = 1 + Sv \cdot ds - Sv$$

Densidad de la pulpa en función de la densidad del sólido y de la fracción de sólidos en volumen.
 $Sv = Sp \cdot (d/ds)$.

Otras relaciones, por sustitución en las anteriores, se dan a continuación:

$$Ps = Sp \cdot d = \left\{ \frac{(d - 1)}{d} \right\} \cdot \left\{ \frac{ds}{(ds - 1)} \right\} \cdot d = \frac{ds \cdot (d - 1)}{(ds - 1)} = Ps$$

$$P_l = P - Ps = d - \frac{ds \cdot (d - 1)}{(ds - 1)} \quad \leftarrow \quad P_l = \frac{(ds - d)}{ds - 1}$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \rightarrow \quad V_l = P_l = \frac{(ds - d)}{ds - 1}$$

$$Sv = Vs = 1 - V_l = \frac{(d - 1)}{(ds - 1)} = Sv$$

$$H = 1 - Sp = 1 - \left\{ \frac{(d - 1)}{d} \right\} \cdot \left\{ \frac{ds}{(ds - 1)} \right\} = \frac{(ds - d)}{d \cdot (ds - 1)} = H$$

3.6. Modificaciones de la densidad, fórmula genérica y aplicaciones

Los procesos y tecnologías utilizadas en minería operan de forma óptima para diferentes parámetros de la pulpa, exigiendo la modificación de las condiciones de la misma, y normalmente el parámetro a modificar es la densidad, al cambiar los procesos tecnológicos.

Como ejemplo se puede indicar que el área de molienda exige densidades de pulpa mayores que la técnica de flotación siendo valores usados para molienda de Sp en el entorno del 40-0% y valores de Sp en flotación del orden de 20 al 40%. Algunos procesos exigen mantener en el baño densidades precisas, ejemplo de la CMD, para producir cortes a densidades prefijadas. Con baños a 2,65 kg/l se consigue que los minerales con densidad menor floten en el baño y los más pesados se hundan produciéndose una clasificación.

La densidad de una pulpa se puede modificar actuando sobre los componentes, sólido y líquido, y para ambos se puede añadir o extraer el componente elegido.

Se considera:

X: Cantidad de agua que se modifica (kg ó l) / dm³ de pulpa.

Y: Cantidad de sólido (mineral), en kg / dm³ de pulpa, que se modifica.

Se toma el convenio de signos: (+) añadir y (-) extraer; y se utilizan las definiciones anteriores para los parámetros y variables.

Dada una pulpa de densidad $d = P/V$, se modifica, al variar sus componentes a una densidad d_1 ; de forma general se verifica:

$$d_1 = \frac{P + X + Y}{V + X + Y/ds}$$

Haciendo las sustituciones para la unidad de pulpa, $V = 1$ y $P = d$, se obtiene la relación:

$$d_1 = \frac{(d + X + Y) \cdot ds}{(1 + X) \cdot ds + Y};$$

3.6.1. Aplicaciones particulares

Disminuir la densidad de la pulpa

a) Disminuir la densidad de la pulpa añadiendo agua; para este supuesto se tienen los valores (ejemplo de tecnología: preparadores, tanques de mezcla):

$$X = a \text{ (litro de agua) / (litro de pulpa).}$$

$$Y = 0, \text{ no se modifican los sólidos.}$$

$$d_1 = \frac{(d + a + 0) \cdot ds}{(1 + a) \cdot ds + 0}; \quad \longrightarrow \quad a = \frac{d - d_1}{d_1 - 1}; \quad (\text{l}_{\text{agua}} / \text{l}_{\text{pulpa}})$$

Se añade agua en algunos (muchos) de los procesos mineralúrgicos por los siguientes motivos:

- Para poder eliminar las arcillas en forma de lodos. Las arcillas, generalmente, envuelven los granos de roca y están más o menos adheridas a la superficie de los granos enmascarando sus propiedades.
- Para conseguir clasificaciones finas o muy finas que, necesariamente, se tienen que hacer por equivalencia (isodromía) empleando un fluido (aire o agua) generalmente agua.
- Porque determinados procesos, como la molienda, se producen con mejores rendimientos en forma de pulpa, siempre que el mineral admita esta forma, que no reaccione o se degrade con el agua.
- Porque el proceso de tratamiento posterior, generalmente concentración (gravimétrica, flotación, etc.), se realiza en húmedo.

b) Disminuir la densidad retirando sólidos de la pulpa; para este supuesto se tienen los valores (ejemplo de tecnología: espesadores o decantadores; recuperación de la magnetita del baño en CMD):

$$X = 0, \text{ no se añade agua.}$$

$$Y = -b \text{ (kg de sólido) / (litro de pulpa).}$$

$$d_1 = \frac{(d + 0 - b) \cdot ds}{(1 + 0) \cdot ds - b}; \quad \longrightarrow \quad b = \frac{ds (d - d_1)}{ds - d_1}; \quad (\text{kg}_{\text{sólido}} / \text{l}_{\text{pulpa}})$$

Aumentar la densidad de la pulpa

- c) Aumentar la densidad de la pulpa retirando agua; para este supuesto se tienen los valores (Ejemplo de tecnología: espesadores o decantadores):

$$X = -c \text{ (litro de agua) / (litro de pulpa).}$$

$$Y = 0, \text{ no se modifica los sólidos.}$$

$$d_2 = \frac{(d + 0 - c) \cdot ds}{(1 - c) \cdot ds + 0}; \quad \longrightarrow \quad c = \frac{d_2 - d}{d_2 - 1}; \quad (l_{\text{agua}} / l_{\text{pulpa}})$$

- d) Aumentar la densidad añadiendo sólidos a la pulpa; para este supuesto se tienen los valores (ejemplo de tecnología: preparadores, tanques de mezcla, medios densos):

$$X = 0.$$

$$Y = e \text{ (kg sólido) / (litro de pulpa).}$$

$$d_2 = \frac{(d + 0 + e) \cdot ds}{(1 + 0) \cdot ds + e}; \quad \longrightarrow \quad e = \frac{ds (d_2 - d)}{ds - d_2}; \quad (\text{kg}_{\text{sólido}} / l_{\text{pulpa}})$$

Desde un punto de vista tecnológico es más sencillo añadir agua o sólidos que eliminar alguno de estos componentes, esto último necesita instalaciones o tecnología más compleja.

3.6.2. Mezcla de dos pulpas

Dos pulpas de densidades d_1 y d_2 y con caudales Q_1 y Q_2 respectivamente, se mezclan en un tanque homogenizador. Se obtiene una pulpa de un caudal Q y una densidad d a determinar. El caudal total es la suma de caudales y la densidad viene dada por la participación proporcional en la mezcla mediante las expresiones siguientes⁷:

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_1 + Q_2; \quad d = d_1 \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} + d_2 \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}; \text{ (t/m}^3\text{)}$$

3.7. Gráficos, ejercicios y ejemplos de utilización

Se incluyen, a continuación, dos gráficos que representan la variación de la densidad de una pulpa según el mineral, caracterizado por su densidad, y el parámetro S_p , fracción en peso del mineral y el parámetro S_v , fracción en volumen del mineral.

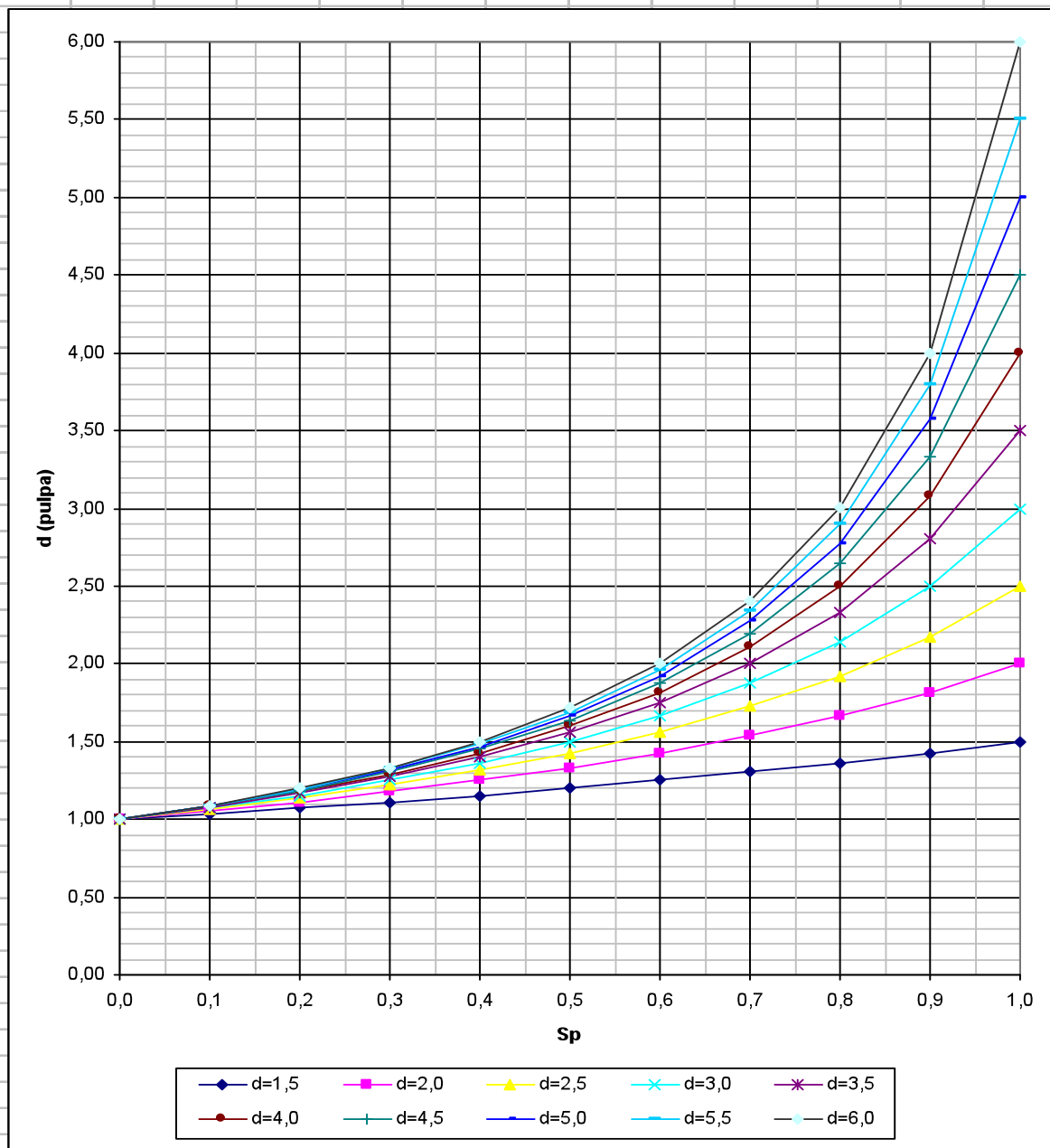
⁷ La verificación es inmediata considerando volúmenes y masas por unidad de tiempo, así para la pulpa 1 será $d_1 = P_1 / Q_1$; para la pulpa 2 es $d_2 = P_2 / Q_2$, de donde la cantidad de sólidos en suspensión es: $P_1 = d_1 \cdot Q_1$ y $P_2 = d_2 \cdot Q_2$ respectivamente.

Aplicando la definición de densidad a la nueva pulpa formada, suma de las anteriores, da: $d = P / Q$, $d = (P_1 + P_2) / (Q_1 + Q_2)$, que substituyendo: $d = (d_1 Q_1 + d_2 Q_2) / (Q_1 + Q_2)$ que es la expresión indicada.

$$d = \frac{d s}{d s + S p - S p d s}$$

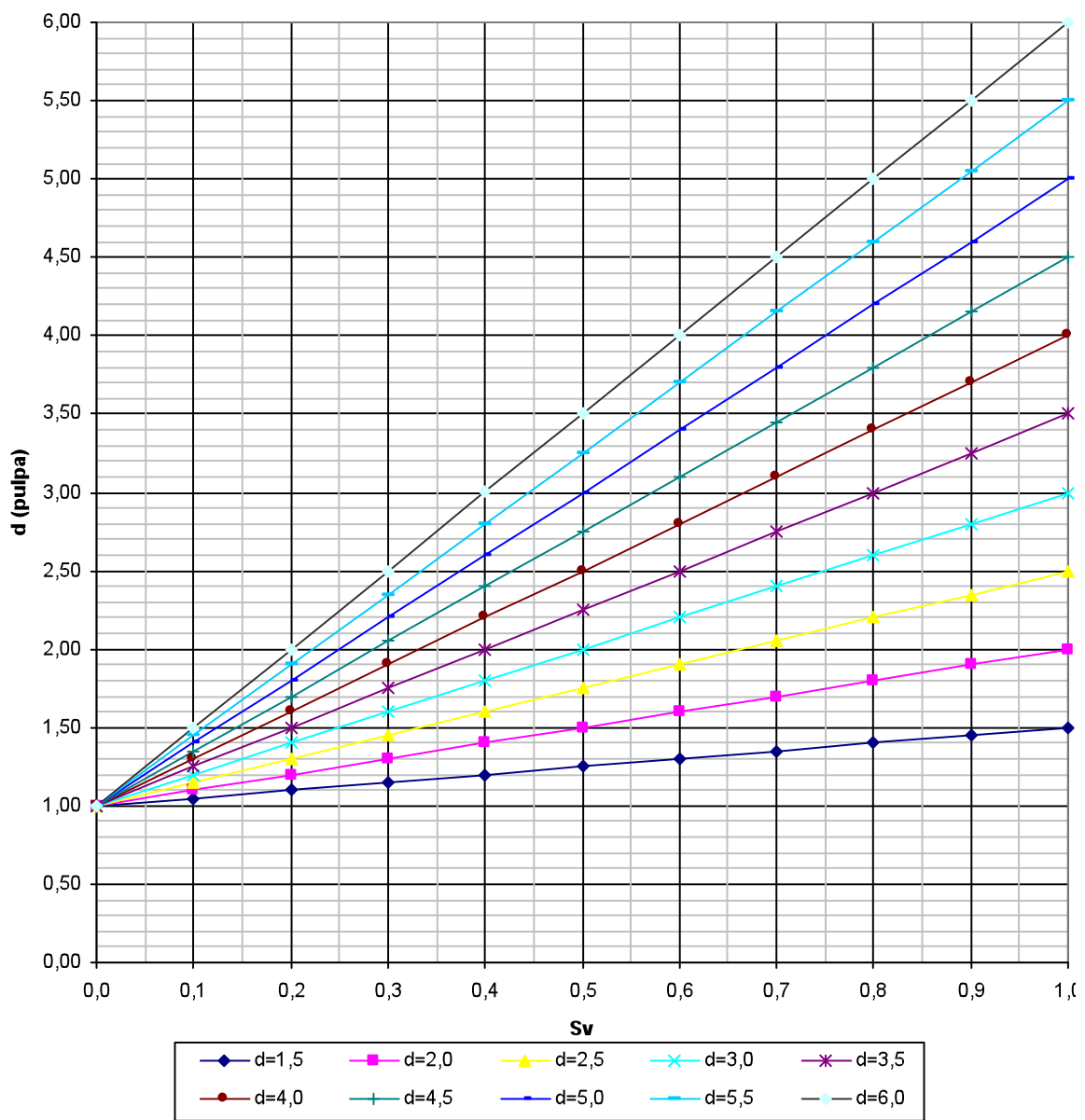
Densidad de una pulpa en función de la densidad del sólido y de la fracción de sólidos en peso (fluido agua)

Sp \ ds	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,1	1,03	1,05	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09
0,2	1,07	1,11	1,14	1,15	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20
0,3	1,11	1,18	1,22	1,25	1,27	1,29	1,30	1,32	1,33	1,33
0,4	1,15	1,25	1,32	1,36	1,40	1,43	1,45	1,47	1,49	1,50
0,5	1,20	1,33	1,43	1,50	1,56	1,60	1,64	1,67	1,69	1,71
0,6	1,25	1,43	1,56	1,67	1,75	1,82	1,88	1,92	1,96	2,00
0,7	1,30	1,54	1,72	1,88	2,00	2,11	2,20	2,27	2,34	2,40
0,8	1,36	1,67	1,92	2,14	2,33	2,50	2,65	2,78	2,89	3,00
0,9	1,43	1,82	2,17	2,50	2,80	3,08	3,33	3,57	3,79	4,00
1,0	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00



$$d = 1 + Sv \cdot ds - Sv$$

Sv \ ds	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,1	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50
0,2	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00
0,3	1,15	1,30	1,45	1,60	1,75	1,90	2,05	2,20	2,35	2,50
0,4	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00
0,5	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
0,6	1,30	1,60	1,90	2,20	2,50	2,80	3,10	3,40	3,70	4,00
0,7	1,35	1,70	2,05	2,40	2,75	3,10	3,45	3,80	4,15	4,50
0,8	1,40	1,80	2,20	2,60	3,00	3,40	3,80	4,20	4,60	5,00
0,9	1,45	1,90	2,35	2,80	3,25	3,70	4,15	4,60	5,05	5,50
1,0	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00

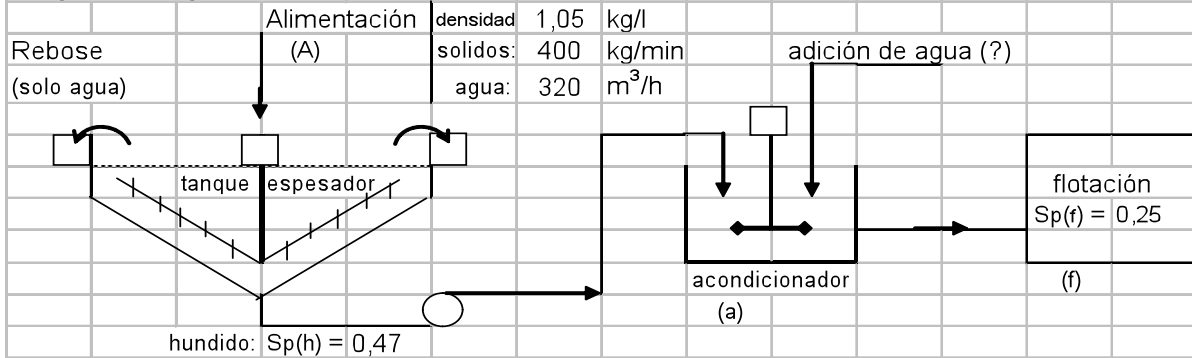


Ejercicio de pulpas

Un tanque espesador se alimenta con una pulpa, densidad $1,05 \text{ kg/l (t/m}^3\text{)}$, compuesta por 400 kg/min de sólidos y $320 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua. El rebose del tanque está formado únicamente por agua y se elimina del circuito. En el hundido sale una pulpa con el 47% de sólidos en peso que alimenta a un circuito de flotación con acondicionador previo. *Calcular:*

- La cantidad de agua, en m^3/h , que será necesario añadir al acondicionador, para entrar en flotación con 25% de sólidos en peso.
- Obtener el balance general de agua del proceso "tanque espesador - acondicionador", y calcular la necesidad global de agua del sistema.

Esquema del proceso



Solución A, cálculo directo

Los sólidos circulan en su totalidad, luego:		$P_s = 400 \text{ kg/min} \longrightarrow 24 \text{ (t/h)}$
Salida del tanque espesador		
P_s	24 (t/h)	
$Sp(h) = \frac{P_s}{P_i + P_s} = \frac{24}{P_i + 24} = 0,47$	$\longrightarrow P_i(h) = 27,06 \text{ (t/h)}$	$\longrightarrow \text{m}^3/\text{h}$
Entrada flotación		
P_s	24 (t/h)	
$Sp(f) = \frac{P_s}{P_i + P_s} = \frac{24}{P_i + 24} = 0,25$	$\longrightarrow P_i(f) = 72 \text{ (t/h)}$	$\longrightarrow \text{m}^3/\text{h}$
Adición de agua en el acondicionador: $A_{aa} = 72 - 27,06 = 44,94 \text{ m}^3/\text{h}$		
Agua en el rebose del tanque espesador: $A_{re} = 320 - 27,06 = 292,9 \text{ m}^3/\text{h}$		
Balance de agua sistema espesador - acondicionador		
$B_a = A_{re} - A_{aa} = 292,9 - 44,94 = 248 \text{ m}^3/\text{h}$	excedentes	

Solución B (Repaso de fórmulas)									
a) Cantidad de agua en el acondicionador					Ps:	400 kg/min	24	(t/h)	
Cálculo previo, calcular la densidad de los sólidos (ds), a través del Sp de la alimentación									
$\rho_p(A) = \frac{P_s}{P_i + P_s}$		$\frac{24}{320 + 24}$	(t/h)	$= 0,0698$	$6,977$	% de sólidos en peso			
$d_s = \frac{d \times S_p}{1 - d + d \times S_p}$		$\frac{0,0698 \times 1,05}{1 - 1,05 + 0,0733}$	$(kg/l \text{ o } t/m^3)$	$d_s = 3,15$	kg/l				
El tanque acondicionador recibe una pulpa de densidad (da) y se acondiciona por adición de agua hasta la densidad (df) necesaria en flotación.									
Con la igualdad básica de:					Salida de tanque =	Entrada acondicionador, calculamos (da)			
$da = \frac{d_s}{d_s + S_p - S_p \times d_s}$		$\frac{3,15}{3,15 + 0,47 - 1,48}$		$= 1,472$	$(kg/l \text{ o } t/m^3)$				
Con la igualdad básica de:					Salida de acondicionador =	Entrada flotación, calculamos (df)			
$df = \frac{d_s}{d_s + S_p - S_p \times d_s}$		$\frac{3,15}{3,15 + 0,25 - 0,79}$		$= 1,206$	$(kg/l \text{ o } t/m^3)$				
Ahora se trata de resolver un problema de variación de densidad desde la entrada al tanque hasta la salida del tanque, entre los valores $da = 1,472$ (t/m ³) y $df = 1,206$ (t/m ³) siendo $da > df$									
La expresión en: m ³ de agua / m ³ de pulpa, viene dada por: (ver teoría)									
$X = \frac{da - df}{df - 1}$		$\frac{1,472 - 1,206}{1,206 - 1}$		$= 1,2956$	m ³ agua/ m ³ pulpa				
Para conocer el caudal de entrada utilizamos los valores de la salida del espesador									
$S_p(h) = \frac{P_s}{P_i + P_s}$		$\frac{24}{24 + X}$		$X = 27,064$	t/h	m ³ / h hundido			
Los sólidos, con $P_s = 24$		t/h	$V_s = \frac{P_s}{d_s}$	$= \frac{24}{3,15}$	$= 7,619$	m ³ / h			
El caudal de entrada al acondicionador será:									
$Q_a = V_{sólidos} + V_{agua}$		$Q_a = 34,683$	m ³ / h						
La adición de agua será:					$Q_{agua} = Q_a \times Y$	$34,68 \times 1,296$	$= 44,936$	m³ / h	
b) Balance general de agua del proceso					tanque espesador - acondicionador				
Tanque espesador:		Entrada	Et	320	dato				
		Rebose	Rt	292,94	R=E-H	Excedente	292,9	m ³ / h	
		Hundido	Ht	27,064	calculado				
Acondicionador		Entrada	Ea	27,064	Ea =Ht	Necesidad	44,94	m ³ / h	
		Añadido	Aa	44,936	calculado				
					Balance general =	248	m ³ / h	excedente	

3.8. Deshidratación de pulpas / Separaciones sólido líquido

La separación del sólido y el líquido (agua normalmente en minería) que compone la pulpa es una tecnología formalmente opuesta a la formación de pulpas pero de mayor complejidad en tanto que la formación es una simple mezcla por dosificación adecuada de componentes y remoción o agitación hasta conseguir las características adecuadas de homogeneidad y la deshidratación exige un procedimiento técnico de cierta complejidad.

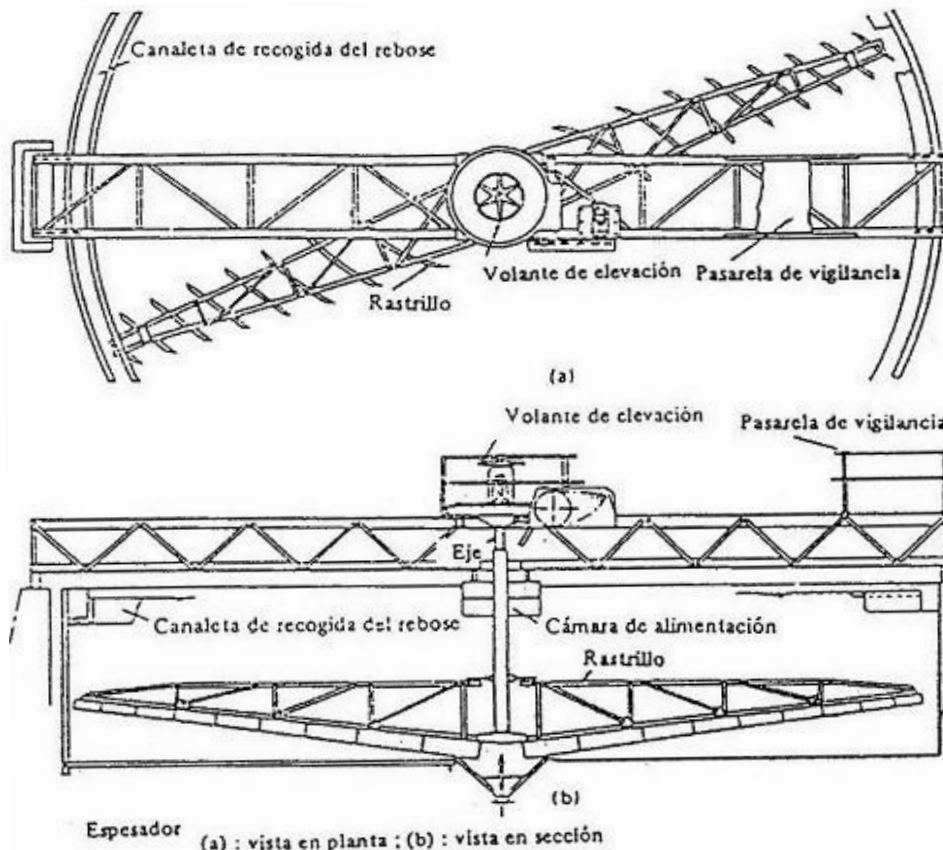
Las tecnologías de separación sólido-líquido se pueden clasificar por el proceso técnico utilizado y así se tienen los procesos de:

- A) Sedimentación, mediante tanques espesadores.
- B) Filtración, con sistema de vacío (tambor, discos, bandas horizontales) o de presión (continuos o discontinuos).
- C) Secado térmico, mediante hornos giratorios horizontales.
- D) Otros sistemas, centrifugadoras, hidrociclones, agotadores vibratorios, etc.

A) **Sedimentación.** Proceso que consiste en el empleo de grandes tanques, (tanques decantadores) con circulación lenta de la pulpa dentro del equipo y en la que se separa el sólido por decantación, va al fondo, y el líquido se obtiene en el rebose. Según interese una pulpa más concentrada se denomina “tanque espesador” y si el interés es un agua limpia se denomina “tanque clarificador”.

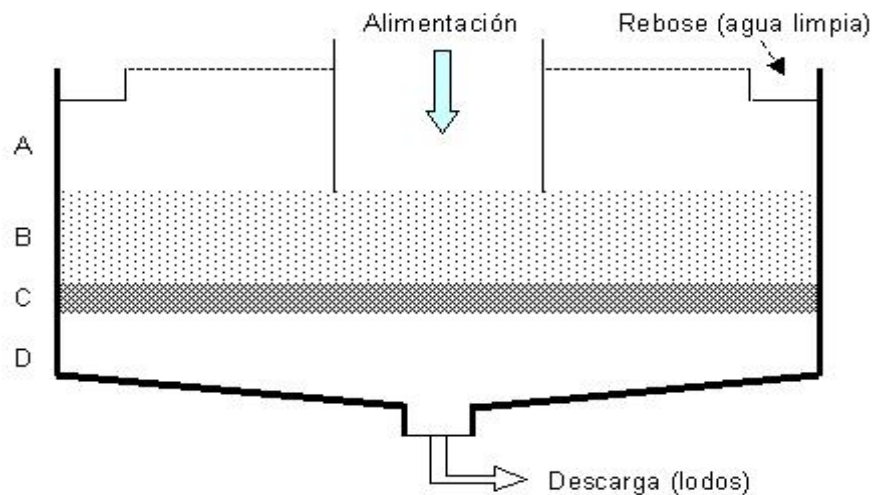
La tecnología utiliza tanques (depósitos cilíndricos) o conos y se utilizan floculantes o coagulantes para que las partículas formen, por aglomeración, partículas de mayor tamaño y su desplazamiento en el seno del agua sea más rápido y favorezca la separación.

Los tanques espesadores (decantadores y clarificadores) son normalmente depósitos cilíndricos de diámetro elevado y su construcción, según tamaño, responde a dos modelos constructivos según la longitud del diámetro:



- a1) *Con puente.* Hasta diámetro de 35 - 40 m.
- a2) *De columna central.* Para diámetros mayores de 40 m y en este caso la tracción puede ser mediante mecanismo radial giratorio o mediante tracción en los dos extremos del diámetro siendo el pilar central únicamente de apoyo y para distribución de la pulpa.

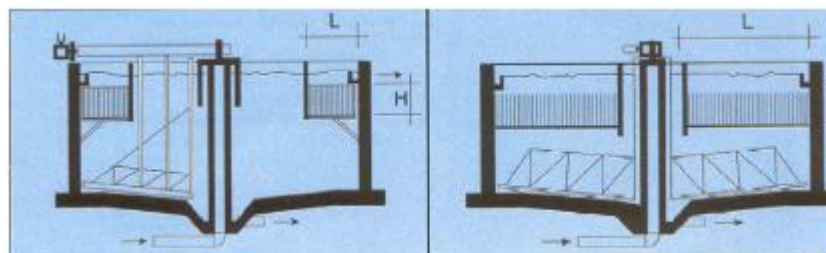
La velocidad de la estructura central (puente o rastrillos) es muy lenta, de unos 8 m/minuto (1,7 m/s) de velocidad periférica. Las velocidades de decantación son variables según el fin deseado siendo este parámetro una variable importante en la definición de las dimensiones del tanque, pueden considerarse rangos entre 1 cm/s y 0,02 cm/s (1 s/cm y 60 s/cm).



- A: Zona de clarificación (se descarga el agua limpia): 0,6 - 1,5 m
 B: Zona de alimentación (se produce la caída de las partículas): 0,6 m
 C: Zona de transición (descenso de la velocidad de sedimentación)
 D: Zona de compresión y recogida hacia la descarga

Figura 3.1. Zonas principales (diferenciadas) de un decantador.

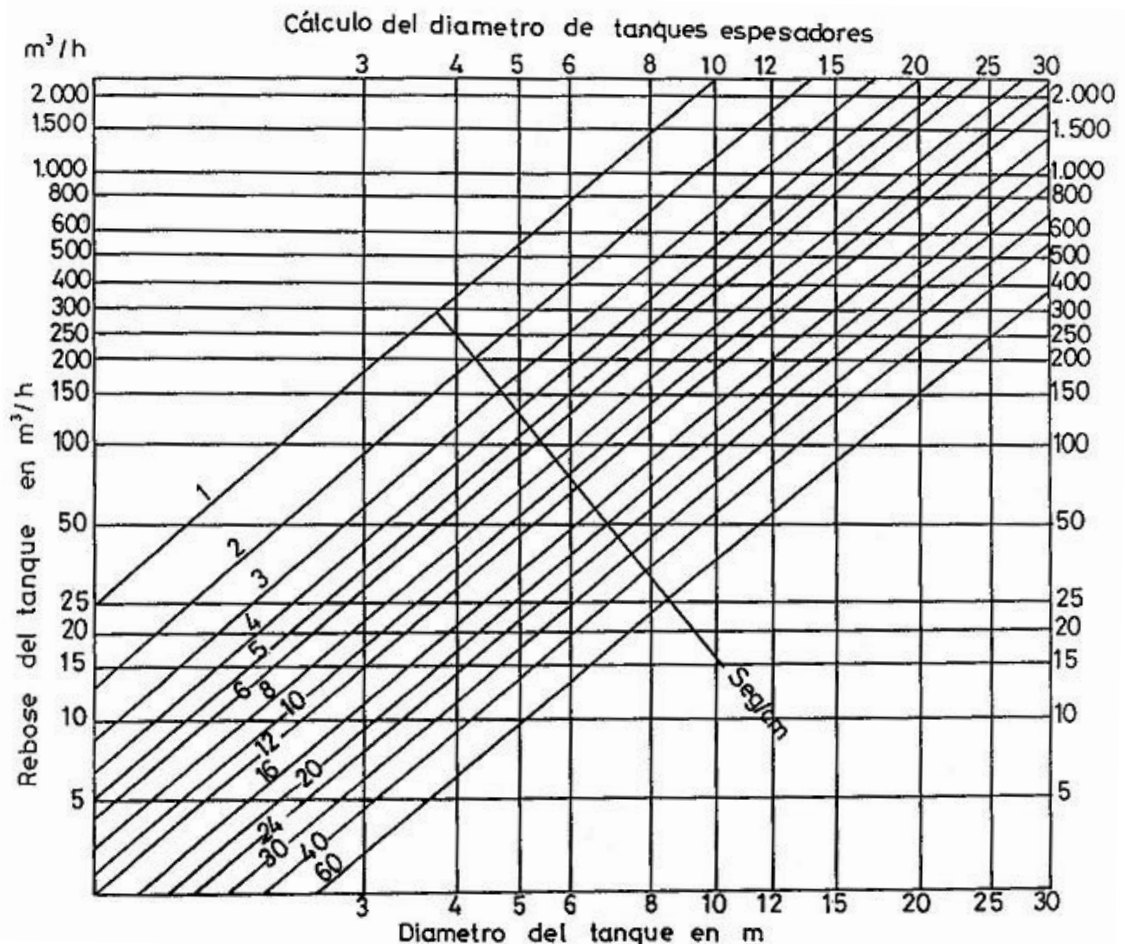
- a3) *Otros diseños, decantador de lamelas.* Incorporan modificaciones en el interior para aumentar la capacidad en el mismo espacio ocupado. Ejemplo del decantador de lamelas, modelo que incorpora placas o láminas inclinadas de figuras geométricas sencillas (forma cuadrada, hexagonal, octogonal, tipo chevrón, etc., con inclinaciones de unos 60°) en su interior para aumentar la capacidad de sedimentación en menos espacio y que sustituyen a los equipos convencionales (dinámicos o estáticos).





Equipo con lamelas, parcial o total según la superficie ocupada por las lamelas "L" y detalle constructivo de lamelas con forma hexagonal.

- a4) Determinación del diámetro necesario. Para la determinación del diámetro se utilizan expresiones que función de la operación a realizar y de las características de la pulpa y se pueden utilizar gráficos que dan el diámetro del tanque de forma aproximada.



En el gráfico se obtiene el diámetro aproximado del tanque decantador necesario en "m" en función de la velocidad de decantación (inversa de la velocidad) y del caudal necesario en el rebose, parámetro que es función de la humedad o dilución deseada en la pulpa concentrada obtenido por la purga de fondo.

Expresiones de calculo para determinar el tamaño del tanque necesario son del tipo indicado a continuación. Utilizan variables ligadas con la pulpa y con el tipo de mineral que lo forma y son del tipo siguiente.

Según Coe y Clevenger, la relación que da la “*superficie / tonelada / 24 horas*” en función de las diluciones y de las velocidades de sedimentación⁸ es:

$$A = \frac{1,33 \cdot (F - D)}{R \cdot \delta}$$

- A: Superficie en pies cuadrados / tonelada de sólido en 24 horas.
- F: Dilución de la alimentación.
- D: Dilución de la salida inferior.
- R: Velocidad de sedimentación en pies/hora.
- δ : Densidad de la pulpa de alimentación (t/pie³).

Su equivalente en el S.I. de unidades y utilizando la notación de los apuntes es:

- S_A : Superficie necesaria de sedimentación en m²/t/h.
- D_a : Dilución de la alimentación (fracción de líquido respecto al sólido disuelto P_l/P_s).
- D_s : Dilución de la salida inferior.
- V_{lim} : Velocidad de sedimentación en cm/s, en el régimen de Stokes, y con unidades en el S.I.

$$V_{lim} \left(\frac{cm}{s} \right) = \frac{d^2 \cdot g}{\mu \cdot 18} \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot 100$$

- ρ : Densidad de la pulpa de alimentación t/m³ (s: sólido, f: fluido).
- μ : Viscosidad.
- d : Tamaño medio de la partícula.
- g : Aceleración debida a la gravedad.

Con las unidades anteriores la fórmula queda:

$$S_A \left(\frac{m^2}{t \cdot h} \right) = \frac{0,02 \cdot (D_a - D_s)}{V_{lim} \cdot \rho_{pulpa}}$$

Las modificaciones de diseño sobre el tanque decantador tipo, como los tanques de lamelas o los conos, utilizan expresiones particularizadas y en general dependiente de la información del fabricante.

⁸ Se conserva la notación y unidades del original del texto.

a5) *Cono decantador*, la utilización de floculantes y las características de la pulpa permite la utilización de equipos más contenidos en el tamaño del diámetro tal como se muestra en la figura siguiente que corresponde a un cono decantador de la firma NCB, que utiliza el canal de alimentación para producir la mezcla del aglomerante y la pulpa, que se descarga en una cámara central.

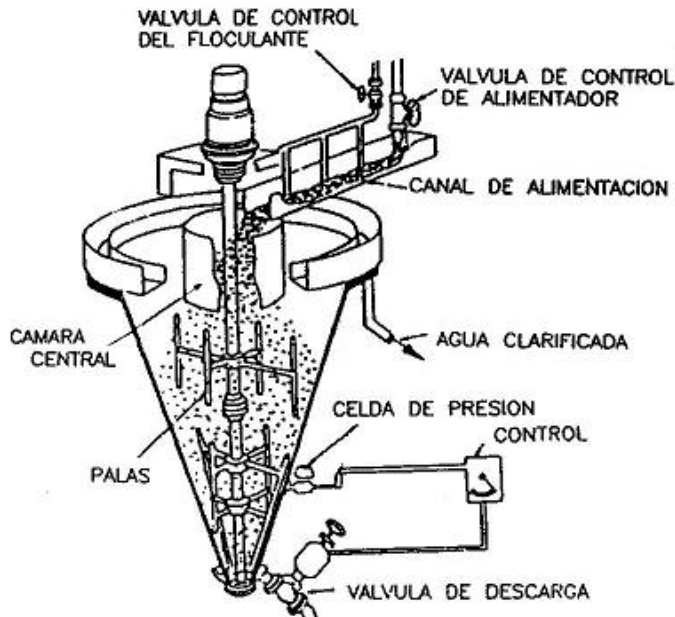


Figura 3.2. Cono decantador de la NCB.

La forma cónica introduce un sistema de funcionamiento distinto del equipo de tal forma que se favorece el espesamiento en el fondo y la mayor dilución en la parte superior.

B) **Filtración.** La pulpa, previamente tratada con sistemas para conseguir una dilución lo más baja posible, se introduce en forma de torta en un equipo de filtrado giratorio que mediante presión externa (instalación de sistemas de presión) y generación de vacío (instalación de sistema de vacío), según la tecnología utilizada, extrae todo el agua posible. Estos equipos necesitan como tecnología auxiliar una instalación de aire a presión y un sistema de vacío.

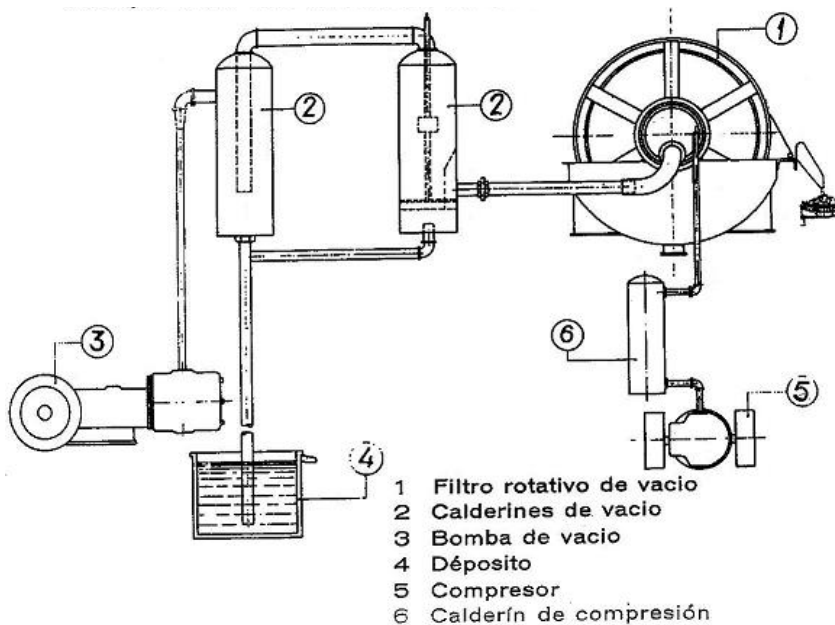


Figura 3.3. Esquema de instalación de un filtro.

C) **Secado térmico.** Se realiza mediante hornos rotatorios horizontales en los que se introduce la pulpa, ya con un nivel de humedad lo más bajo posible, y mediante el aporte de energía se evapora los restos de humedad hasta el nivel que se considera admisible en mercado.

D) **Otros sistemas.** Se utiliza la tecnología minera de ciclones, (hidrociclones), agotadores vibratorios (cribas), clasificadores de racletas, etc., y en general todos aquellos sistemas y mecanismos que tienen capacidad de modificar la proporción de agua y sólido dentro de la pulpa por procesos normalmente mecánicos.

Estos procesos pueden ser anteriores a un proceso puro de deshidratación por el principio de que la tecnología de tipo mecánica (ej.: cribas vibratorias agotadoras) son energéticamente más económicos y de instalación menos compleja, y se reservan los métodos puros de deshidratación para las fases finales del proceso.

3.8.1. Parámetros para determinar (medir) la pulpa

En los procesos de separación sólido líquido se utilizan preferentemente dos variables de control relacionadas con la proporción de agua y de sólido.

Inicialmente, se utiliza la dilución cuando la cantidad de agua en la pulpa es un valor elevado, y que está definida por la relación del peso del agua con respecto al peso del sólido:

$$D \text{ (dilución)} = \text{Peso del líquido} / \text{Peso del sólido} = P_{\text{liq}} / P_{\text{sol}} = (1 - S_p) / S_p.$$

En sucesivos escalones de eliminación del agua de la pulpa la dilución disminuye y cuando este valor es muy bajo se utiliza entonces la humedad que viene definida por la relación del peso del líquido con respecto al peso de la pulpa:

$$H \text{ (humedad)} = \text{Peso del líquido} / (\text{Peso del líquido} + \text{Peso del sólido}).$$

$$H = P_{\text{liq}} / (P_{\text{liq}} + P_{\text{sol}}) = 1 - S_p ; S_p: \text{Fracción de sólidos en peso.}$$

3.8.2. Floculantes y coagulantes

En las tecnologías donde la separación se efectúa por desplazamiento de las partículas dentro de la pulpa, adquiere relevancia el tamaño de las partículas en el sentido de que partículas de mayor tamaño se desplazan, normalmente, con mayor velocidad en el sentido descendente dentro de un tanque y este efecto facilita la decantación. Las partículas de tamaño pequeño como es el caso de los minerales en forma de pulpa se desplazan siguiendo la ley de Stokes (movimiento lento). Para facilitar el desplazamiento y disminuir el tiempo de decantación⁹ se emplean floculantes y coagulante.

Las partículas dentro de un baño, en forma de pulpa, están sometidas a dos tipos de fuerzas:

- a) Fuerzas de Van Der Waals. Fuerzas de atracción que tienden a unir las partículas.
- b) Fuerzas de repulsión eléctrica en la superficie de las partículas, que tienden a separar las partículas. (Generalmente grupos con carga negativa $-(OH)^-$ para $pH \geq 4$ y grupos con carga positiva $+(OH_3)^+$ para $pH < 4$).

La acción de estas fuerzas da lugar a una sedimentación extremadamente lenta y muy poca compresión (S_p muy bajo).

⁹ Cuando el tiempo de decantación disminuye se necesitan equipos de menor tamaño.

Para compensar este efecto se utilizan electrolitos (inorgánicos u orgánicos) con carga opuesta a la de las partículas que neutralizan las cargas de repulsión, y las fuerzas de Van Der Waals (atracción) hacen que las partículas contacten y formen grupos con lo que la gravedad es mucho mayor (disminuye el efecto de resistencia dinámica por aumento de tamaño) y se produce la sedimentación.

Como coagulantes se utilizan Al^{+++} , Ca^{++} , Fe^{+++} , SO_4^- .

Los floculantes producen un efecto de adsorción en la superficie de las partículas y, consiguientemente un puenteo entre varias partículas con lo que se produce igualmente un aumento de la masa por unidad, aumento de la gravedad como en el caso de utilización de coagulantes.

Los floculantes son poli-electrolitos orgánicos de cadena larga (poliacrilamidas $[-CH_2 - CH - C - NH_2]_n$). Pueden ser aniónicos (+), catiónicos (-) o no iónicos.

En ambos caso, coagulantes o floculantes, las disoluciones son muy reducidas del 1 – 2 ‰ (por mil) y la dosificación correcta es muy necesaria. Tanto el defecto de dosificación (no produce ningún efecto aglomerante y causa un gasto) como el exceso de dosificación (que puede producir el efecto contrario al deseado, dispersión de las partículas) son efectos no deseados. Se suele dosificar en puntos del baño donde se asegure una distribución en el seno de la pulpa y posteriormente se genera una zona tranquila, libre de agitación, que facilita la decantación.

Se puede utilizar la floculación selectiva cuando se pretende eliminar o concentrar un determinado compuesto de los que forman la pulpa.

En la Figura 3.4¹⁰ se muestra un equipo minero de depuración de aguas de 25 m de diámetro, con columna central de apoyo y soporte de la turbina de mezcla. Tiene apoyo lateral del puente central. La campana que divide la zona de mezcla (zona inmediata al eje de la turbina) de la zona tranquila se soporta mediante tirantes a la estructura soporte diametral.

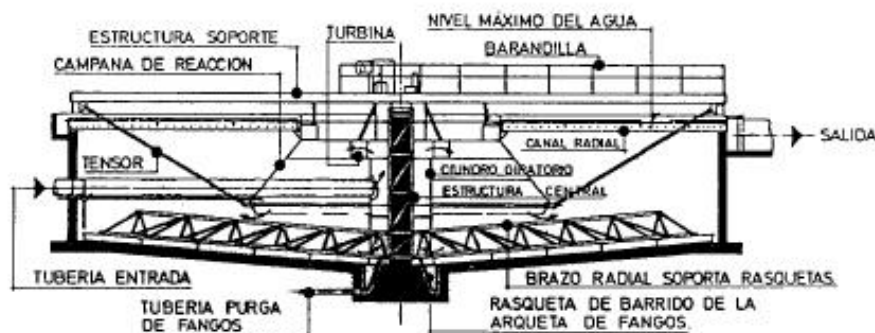


Figura 3.4. Equipo minero de depuración de aguas.

La figura representa un equipo decantador–floculador, realiza ambas funciones. La zona central dispone de una campana y una turbina de velocidad regulable que crea una succión y recirculación dentro de la campana interna y produce una turbulencia y un efecto de succión para garantizar una mezcla homogénea entre el agua de entrada y el floculante. La zona exterior de la campana, zona tranquila, facilita la decantación de los lodos y las rasquetas de fondo, en su giro, conducen los lodos hacia una arqueta situada en el fondo del decantador donde pueden ser evacuados o bombeados a otras instalaciones.

El equipo trabaja para obtener una velocidad crítica próxima a 1 m/h (36 segundos/cm) de velocidad de decantación de los lodos.

¹⁰ Corresponde al esquema de uno de los tanques de depuración de aguas en Lignitos de Meirama, A Coruña.