

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE INGENIERÍA

APUNTES DE

**SEPARACIÓN DE FASES
POR MECANICA DE LOS
FLUIDOS**

CÁTEDRA DE OPERACIONES UNITARIAS

SEPARACIONES DE FASE POR MECANICA DE LOS FLUIDOS

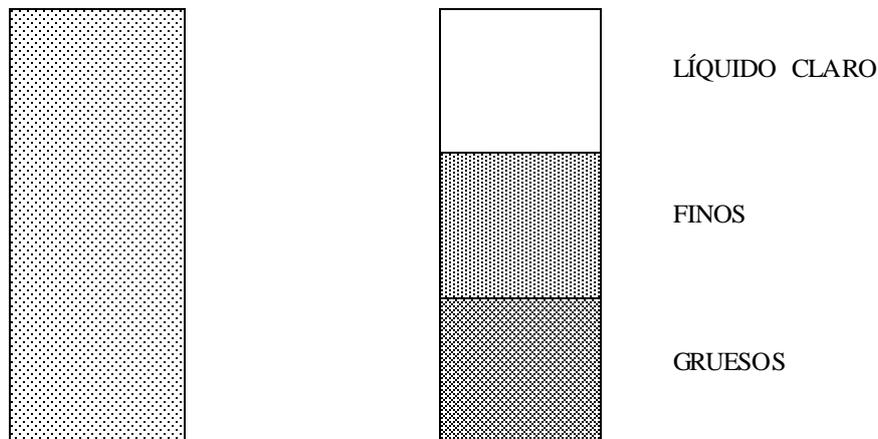
SEDIMENTACION

Mecanismo de sedimentación de las partículas.

Si en un recipiente con agua dejamos caer una mezcla de sólidos A y B de distinto peso específico, pero todas del mismo tamaño y forma, las más densas llegarán al fondo primero separándose de las menos densas. De esta forma tendremos dos capas superpuestas en el fondo del recipiente: la capa inferior con el sólido A (más denso) y la capa superior con el sólido B (menos denso). Si ahora repetimos la experiencia con los mismos materiales pero con partículas de tamaños distintos las partículas más gruesas caerán más rápidamente pudiéndose observar la siguiente superposición de capas (de abajo hacia arriba):

- Capa inferior: granos gruesos del sólido A (sedimentan con una velocidad u_1).
- Capa intermedia: granos finos del sólido A junto con granos gruesos del sólido B (sedimentan con una velocidad u_2).
- Capa superior: granos finos del sólido B (sedimentan con una velocidad u_3). Evidentemente: $u_1 > u_2 > u_3$

Este proceso se ha observado cinematográficamente y se ha comprobado que pasados unos breves instantes las partículas se separan formando capas que caen a velocidad constante. La velocidad de caída depende del tamaño forma y naturaleza de las partículas que componen la capa. Como la velocidad se mantiene constante, las capas se irán alejando cada vez más unas de otras cuando caigan.



Sedimentación de una partícula esférica en el seno de un líquido

Supongamos una partícula esférica que cae en el seno de un líquido. Sobre ella actúan las siguientes fuerzas:

$$\text{Peso de la partícula} = mg = P_s V_g = \pi D^3 P_s g / 6 \quad (\text{descendente})$$

$$\text{Fuerza de flotación} = \pi D^3 P g / 6 \quad (\text{ascendente})$$

$$\text{Fuerza de frotamiento} = A P u^2 \cdot \Phi_1(\text{Re}) = (\pi/4) D^2 P u^2 \cdot \Phi_1(\text{Re}) \quad (\text{ascendente})$$

En estas fuerzas se evidencia que la fuerza de frotamiento aumenta con el cuadrado de la velocidad mientras que las otras dos permanecen constantes en el tiempo. Es evidente que la partícula está sometida a una fuerza de frenado que irá disminuyendo la aceleración hasta alcanzar una velocidad límite máxima. En esta condición las fuerzas ascendentes igualan a la fuerza descendente y se puede escribir:

$$\pi D^3 P_s g / 6 = \pi D^3 P g / 6 + (\pi / 4) D^2 P u^2 \cdot \Phi_1(Re)$$

despejando u se puede obtener la velocidad máxima de sedimentación, o bien conocida esta se puede obtener el diámetro de la partícula.

$$u = \sqrt{\frac{4D(P_s - P)g}{6P \Phi_1(Re)}} \quad 1$$

Para poder operar esta ecuación se necesita conocer los valores de la función del número de Reynolds. Esta función tiene un significado análogo al coeficiente f estudiado en Dinámica de los Fluidos, y depende del número de Reynolds:

$$\Phi_1 = 12/Re \text{ para } Re < 2$$

$$\Phi_1 = 12/Re(1 + 0,14Re^{0,7}) \text{ para } 2 < Re < 2000$$

$$\Phi_1 = 0,25 \text{ para } 3000 < Re < 150000$$

Para valores mayores de Re la curva que lo representa presenta inflexiones por lo que en general se trabaja sólo con los tres primeros.

Si se reemplaza la expresión Φ_1 para un flujo laminar en 1 se obtiene la expresión de la fórmula de Stokes.

Estas expresiones no son totalmente válidas en la práctica debido a que las partículas que sedimentan no son esféricas y además sedimentan muchas partículas al mismo tiempo, por lo que se influyen mutuamente.

Para emplear las mismas fórmulas y métodos cuando se trata de partículas no esféricas se recurre a utilizar en lugar de $(4/6) \cdot$ diámetro de la partícula, el diámetro equivalente que tendría la partícula si fuera perfectamente esférica, es decir la relación Volumen/Area externa. La ecuación 1 se puede escribir:

$$u = \sqrt{\frac{V(P_s - P)g}{A P \Phi_1(Re)}} \quad (2)$$

Hay que tener en cuenta que el coeficiente Φ_1 es función de la esfericidad para un mismo número de Reynolds y está graficado en función de Re y del coeficiente de esfericidad de las partícula (Σ), que se define:

$$\Sigma = \text{superficie de la esfera de volumen igual al de la partícula} / \text{superficie de la partícula.}$$

La relación V/A está tabulada para distintas formas geométricas en función de sus dimensiones características.

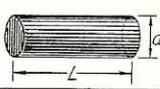
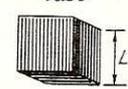
forma de la partícula	dimensiones características	diámetro equivalente D_e	esfericidad	V/V_a máx. (con relación al cubo)
cilindro 	$L=4d$	$1,81d$	0,74	0,53
	$L=2d$	$1,44d$	0,85	0,65
cubo 	-	$1,24L$	0,806	1,00
placa cuadrada  espesor = H	$H=0,2L$	$0,73L$	0,58	0,33
	$H=0,02L$	$0,34L$	0,18	0,073
	$H=0,01L$	$0,25L$	0,12	0,05
disco  espesor = H	$H=0,2d$	$0,67d$	0,72	0,36
	$H=0,02d$	$0,31d$	0,19	0,075
	$H=0,01d$	$0,25d$	0,115	0,045
esfera 	-	d	1,00	0,83

Fig. 1.- Valores del diámetro equivalente, D_e ; de la esfericidad, y del cociente V/V_a para diversas formas de partículas. (Datos de CROFT.)

viscosidad que será la de la suspensión. Hay que tener en cuenta si las partículas son hidrófilas ya que en este caso la solvatación determina alteraciones de viscosidad difíciles de medir y variaciones

Cuando sedimentan muchas partículas conjuntas puede ocurrir que se aglomeren varias de ellas (coagulación o floculación) alterándose el tamaño y forma de las unidades iniciales, por lo que la velocidad límite se altera haciéndose mayor. En la práctica se agregan sustancias floculadoras para acelerar la velocidad de sedimentación, como en el caso de la purificación de aguas. Otras veces, se agregan sustancias dispersantes en el líquido a los fines de mantener estable la suspensión.

Por otra parte la presencia de muchas partículas produce un descenso de la velocidad de caída. En las fórmulas figura la densidad del medio, la cual se ha identificado como la del líquido, cuando en la realidad, si la dispersión es muy concentrada será la densidad de la dispersión. Lo mismo ocurre con la viscosidad que será la de la suspensión. Hay que tener en cuenta si las partículas son hidrófilas ya que en este caso la solvatación determina alteraciones de viscosidad difíciles de medir y variaciones de esta propiedad por la presencia de electrolitos.

También influye sobre la velocidad de sedimentación si las partículas son redondeadas o poseen aristas. Teniendo en cuenta esto se debería reemplazar en 1 o en 2 y todas las ecuaciones derivadas de estas P por P_d

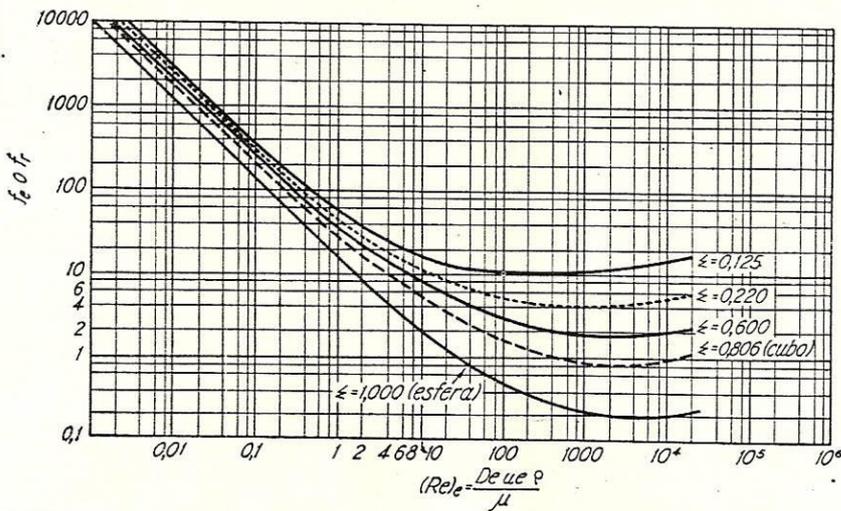
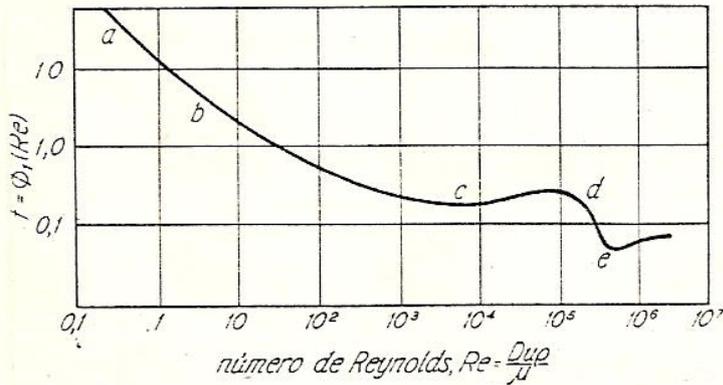


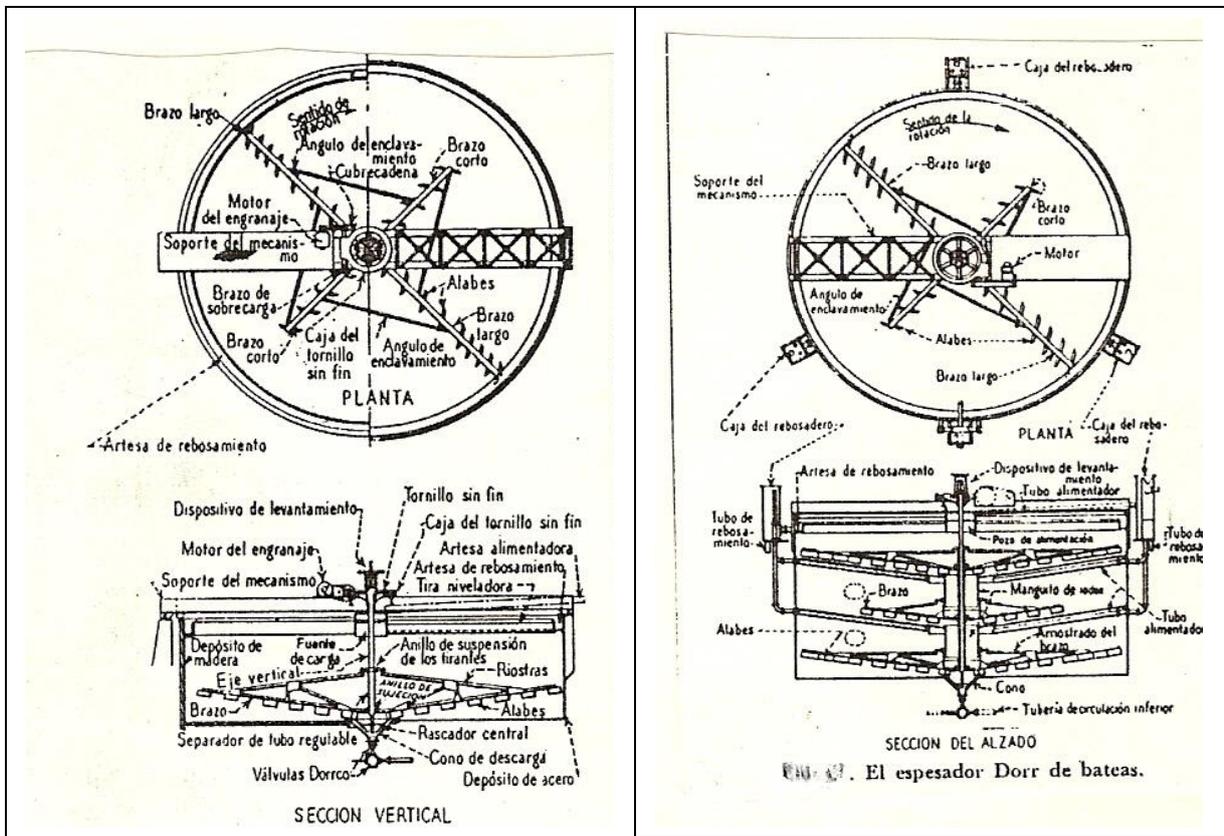
Fig. 2.- Valores que adopta el coeficiente de frotamiento, f , en función del número de REYNOLDS, $(Re)_e$, y de la esfericidad, Σ , de las partículas (WADELL).



.- Representación gráfica de la función $f = \Phi_1$ (Re), para esferas y calculando el Re con las velocidades límites de caída, y los diámetros, D , correspondientes a las partículas.

Equipos para sedimentación:

Dado que la sedimentación es lenta se utiliza lo menos posible. Cuando se debe usar el cálculo se reduce a determinar el tiempo de sedimentación del sólido en el equipo o bien conocido este tiempo calcular la altura del equipo. Los equipos pueden ser espesadores o clarificadores de acuerdo a las características del líquido procesado. Los espesadores se usan para incrementar la concentración de sólidos en la suspensión, mientras que el clarificador elimina una cantidad pequeña de sólidos de la suspensión y por ende produce un líquido con menor concentración de sólidos. Para acelerar el proceso se utilizan aditivos como floculadores que producen adhesión de las partículas pequeñas y permiten una mayor velocidad de sedimentación.



Decantador Dorr

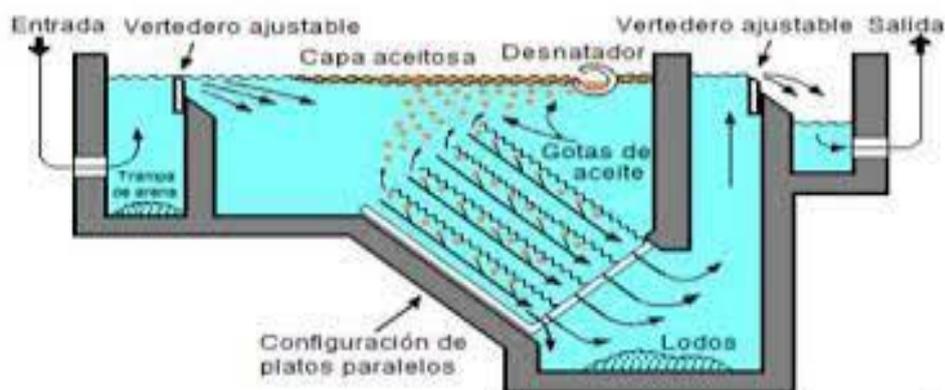
Para la sedimentación y decantación en gran escala se usa el decantador Dorr, que consiste en un recipiente cilíndrico de fondo plano y alta relación diámetro/altura. Coincidiendo con el eje geométrico del recipiente se instala un eje mecánico vertical que posee un rodete. Este gira a baja velocidad y arrastra cuatro o más brazos inferiores largos que casi rozan las paredes del recipiente. Estos brazos están provistos de aletas rascadoras orientadas que desplazan o barren el sólido sedimentado hacia el centro del recipiente por donde sale como suspensión concentrada por una salida central. El líquido de alimentación se introduce por la parte superior central, y el líquido claro se recoge en un desborde lateral que rodea al depósito. El líquido describe un flujo radial, que se va haciendo más lento a medida que se acerca a la periferia, permitiendo un mayor tiempo de sedimentación.

A veces se construyen equipos con dos o más fondos provistos de tantos rodetes como fondos, con lo que se logra una mejor calidad de los materiales sedimentados.

Separador CPI

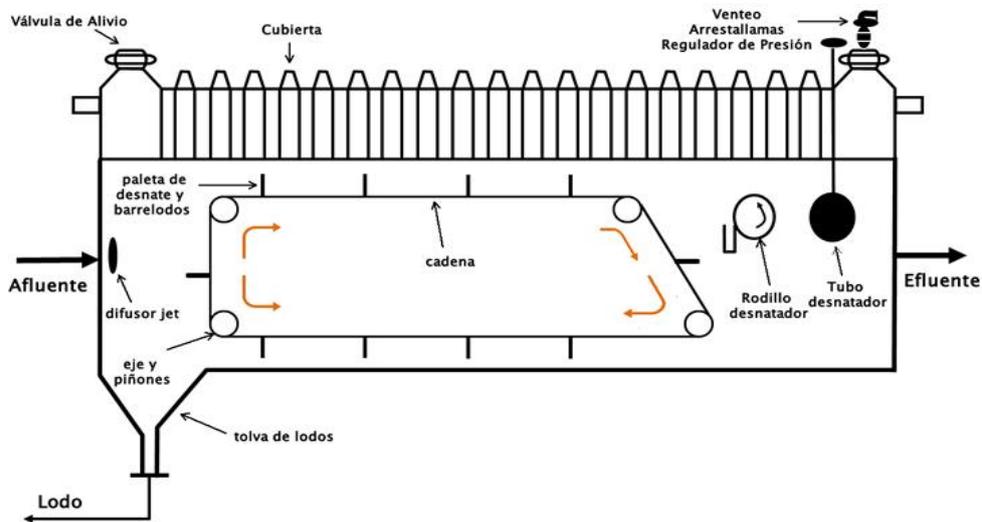
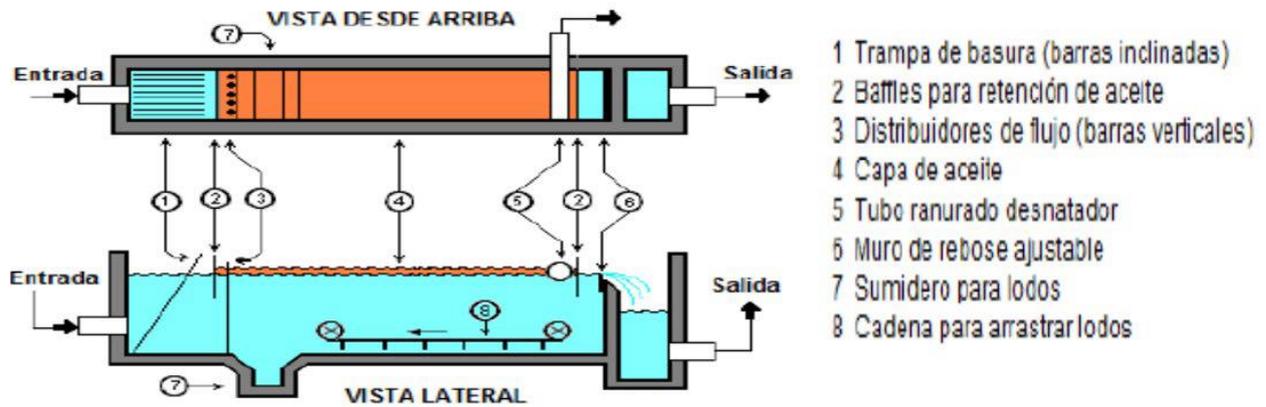
Los separadores CPI (Interceptor de Placas Corrugadas) se utilizan principalmente en la separación de aceite libre de aguas residuales o sólidos suspendidos para el tratamiento de las aguas aceitosas. El principio básico de la diferencia de gravedad entre fases (líquido-líquido o sólido líquido) es empleado en el tratamiento de aguas aceitosas, debido a la separación de las dos fases

Un separador de placas corrugadas está formado por láminas de material corrugado especialmente diseñado para colocarse en contracorriente al flujo, es decir, los caudales de efluentes fluyen hacia abajo mientras que el aceite migra hacia la superficie



Separador API

Es un equipo de separación por gravedad, basado en la Ley de Stokes para definir el incremento en la velocidad de gotas de aceite por sus densidades y tamaño. El diseño del separador está basado en la diferencia de gravedad específica entre el aceite y el agua a ser tratada, porque esa diferencia es mucho menor que la diferencia de gravedad específica entre los sólidos suspendidos y el agua. Los sedimentos precipitan al fondo, donde son arrastrados por un barredor. Al mismo tiempo las gotas de hidrocarburo coalescen (se unen) y forman una capa continua que es separada por un sistema desnatador. Algunos pueden ser piletas rectangulares abiertas a la atmósfera y otros pueden ser sistemas con cobertura para controlar la emisión gaseosa.



Sedimentación centrífuga

En muchas ocasiones se utiliza la sedimentación aplicando fuerzas centrífugas cuya acción equivale a aumentar considerablemente el peso de las partículas y por ello a velocidades de sedimentación muy elevadas. Si m es la masa de una partícula, u_t la velocidad tangencial y r el radio de la trayectoria de la misma. La fuerza centrífuga se puede escribir:

$$F_c = m u_c^2 / r = w u_c^2 / g r$$

como $u_c = W r$ (W = velocidad angular) y $W = 2\pi n$ (n = nº de revoluciones por seg) sustituyendo se tiene:

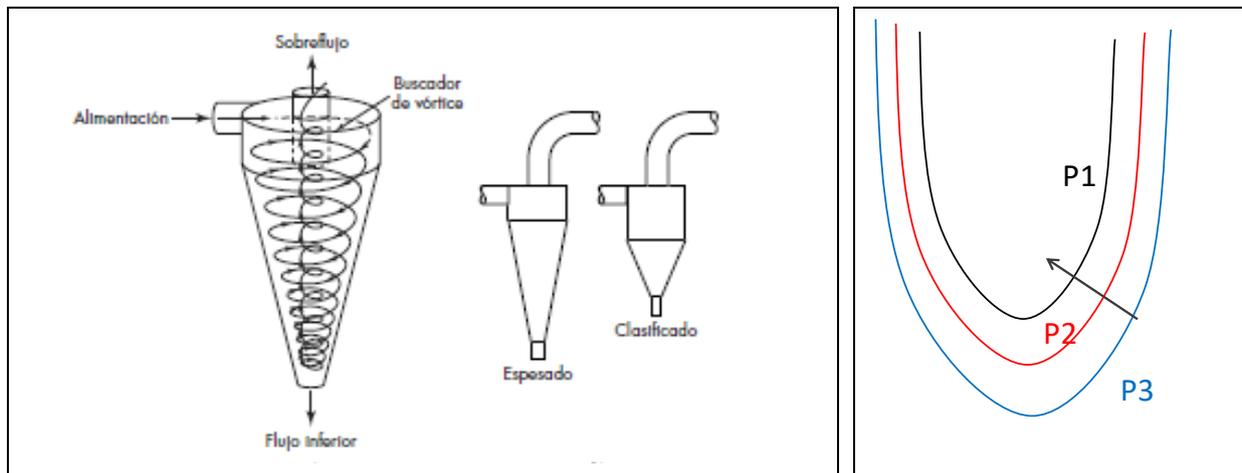
$$F_c = 4\pi^2 w n^2 r / g = 39,5 w n^2 r / g$$

Sin acción centrífuga la fuerza que hace sedimentar la partícula será w mientras que con acción centrífuga será $39,5 n^2 r / g$ veces más grande. En base a este criterio se construyen aparatos que permiten desarrollar altas n , con pequeño r debido a un problema de estabilidad y resistencia mecánica.

En la industria se aplica este concepto a la separación de polvos y/o líquidos dispersos en un gas, sólidos y/o líquidos de distinta densidad de un líquido. En el primer caso se encuentran los ciclones, que se utilizan principalmente para separar un sólido de un gas, y en el segundo caso las centrífugas que se usan para separar líquidos de distinta densidad y sólidos de un líquido. Además se pueden incluir los hidrociclones y los separadores de gas. Los hidrociclones mantienen la misma configuración de los ciclones pero se usan para separar sólidos de líquidos o líquidos de distinta densidad, uno de los cuales se halla en pequeña proporción. Los separadores de aire se usan para separar y clasificar sólidos de distinta granulometría o densidad.

En los ciclones y en los hidrociclones el fluido dispersante entra tangencialmente en la parte superior de un cuerpo cilíndrico a elevada velocidad. La fuerza centrífuga desarrollada por el movimiento rotacional obliga a las partículas a sedimentar sobre las paredes en donde pierden velocidad, mientras que el movimiento en espiral de la corriente de gases lo arrastra hacia abajo, hasta la zona cónica donde descarga, mientras que el aire libre de partículas asciende por la parte central formando una segunda corriente helicoidal y sale por el orificio superior.

El efecto de salida del aire limpio por el centro se debe a la formación de un vórtice forzado en donde la presión en el centro para una misma altura es menor que en la periferia. También se debe cumplir que el diámetro de salida del cono inferior sea menor que el diámetro de salida del tubo superior.



Vista del desplazamiento de fluidos y sólidos

Esquema de presiones vórtice

Para aumentar el efecto centrífugo se pueden aplicar distintas medidas:

- disminuir D (diámetro del cuerpo cilíndrico) está limitado por el caudal
- aumentar la velocidad V (no más de 20 m/s)
- reducir d (diámetro del tubo de entrada)
- aumentando el recorrido o tiempo de permanencia en M (zona anular) que es la zona más activa de forma tal que el aire dé 1,5 a 2 vueltas.

Rendimiento: se define como la cantidad de polvo que retiene que es función del tamaño y forma de las partículas.

Cuando se pide un ciclón se indica rendimiento exigido, diámetro de partículas y forma de las mismas.

Partícula más fina colectada.

El gas más las partículas entran al ciclón en forma espiral con una velocidad V_e y un diámetro de espiral d . Si designamos a N_s = número de espiras y R_c = radio del ciclón ($D/2$) la distancia recorrida por el gas en el ciclón = $2\pi R_s.N_s$

Tiempo recorrido $t = 2\pi R_c.N_s/V_e$

Velocidad de deriva (de la formula de Stokes $g.d_g^2(P_s-P_g)/18\pi$)

$V_d = (V_e^2/R_c).d_g^2(P_s-P_g)/18\pi$

$V = e/t = d.V_e/2\pi R_s.N_s = (V_e^2/R_c).d_g^2(P_s-P_g)/18\pi$

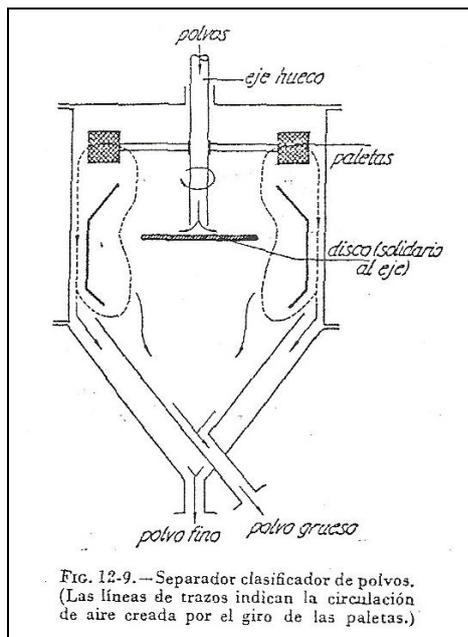
$d_g = [9d\mu/\pi.N_c.V_e.(P_s - P_g)]^{1/2}$

d_g es el diámetro mínimo partícula a distancia d de la pared .

Serán colectadas otras más finas que están a $y < d$ y cuyo ϕ sea igual a $(y/d)^{1/2}$ veces d_g .

Separadores centrífugos

Los separadores centrífugos producen el movimiento rotacional mediante el giro de un disco interior junto con un rodete con paletas que acompaña al disco y permite la clasificación por tamaño mediante un conjunto de corrientes de aire.



Clasificación y concentración hidráulica

La sedimentación es una operación muy lenta y requiere el uso de equipos voluminosos, además de no poder recoger más de dos fracciones sedimentadas sin grandes problemas. Para evitar estos inconvenientes se ha desarrollado la separación de fases mediante el uso de fluidos en movimiento, con lo que se mejora notablemente la velocidad y características de la separación.

Supongamos que se posee una sustancia con dos tamaños de grano $D_1 < D_2$ y que se vuelcan en el interior de un tubo vertical por donde circula una corriente de aire desde abajo hacia arriba. Las partículas tienden a caer por su propio peso, pero además el aire que circula tiende a arrastrar las

partículas. Habrá una velocidad del aire con que las partículas más finas son arrastradas y las grandes caen (u_1), mientras que habrá otra velocidad donde se arrastran las partículas finas y las gruesas (u_2). Si se considera que se puede aplicar la ecuación 1 donde se incluye en una constante a todo lo que no contenga a D , se puede escribir que

$$u_1 = k \cdot (D_1)^{1/2}$$

$$u_2 = k \cdot (D_2)^{1/2}$$

Si la velocidad del aire es inferior a u_1 todos los sólidos caerán al fondo del tubo, mientras que si es igual a u_1 los sólidos gruesos caerán y los finos se mantendrán en suspensión. Si la velocidad del aire es igual a u_2 los gruesos quedarán en suspensión y los finos serán arrastrados, y si es mayor todos los sólidos serán arrastrados. De esta forma se pueden separar dos sólidos usando una corriente de aire. Si se desean separar y clasificar mezclas con mayor número de tamaños de partículas se colocan varias unidades como las descritas en serie.

En la realidad se presenta la situación tener que separar no solamente partículas de distinto tamaño sino de distinta densidad. Para analizar la influencia de la densidad consideremos todas las partículas del mismo tamaño y se puede aplicar la ecuación de la velocidad en forma similar a la anterior:

$$u_1 = K (P_{s1} - P)^{1/2}$$

$$u_2 = K (P_{s2} - P)^{1/2}$$

Para lograr la separación bastará con que el fluido lleve una velocidad intermedia entre u_1 y u_2 , pero combinando los dos casos nos encontramos con partículas de distinto tamaño y distinta densidad que tienen la misma velocidad de decantación, de esta forma pueden caer al mismo tiempo una partícula de diámetro D_1 y densidad P_1 y otra de diámetro $D_2 < D_1$ y densidad $P_2 > P_1$. Si se llevan estas consideraciones a una expresión matemática tendremos

$$u_1 = K [(P_{s1} - P)D_1/P]^{1/2}$$

$$u_2 = K [(P_{s2} - P)D_2/P]^{1/2}$$

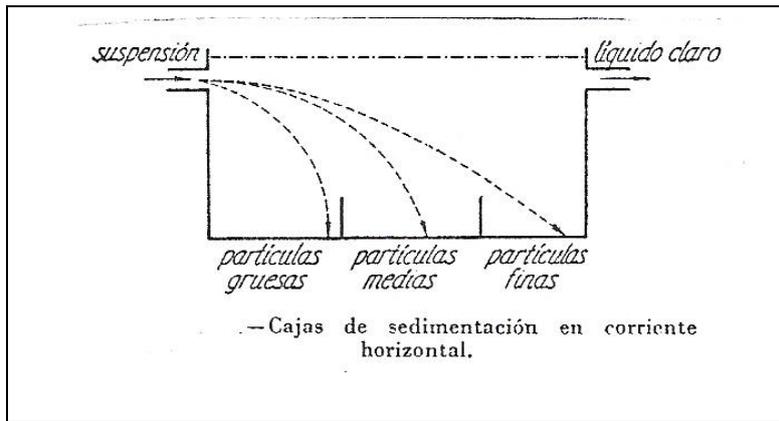
Se pueden definir las condiciones de la separación estableciendo las velocidades para los distintos diámetros de partículas y sus densidades. Si la relación obtenida no es adecuada se puede modificar la densidad de la solución utilizando una gran cantidad de sólidos (utilizando un líquido denso).

Separaciones hidráulicas sin llegar a velocidades límites

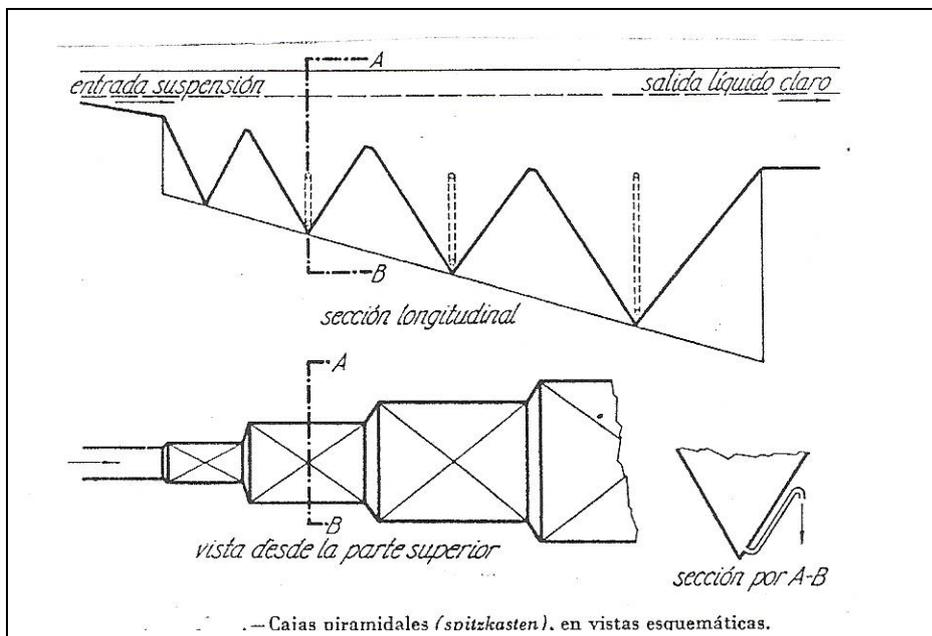
Sean dos sustancias con distinta densidad, para tiempos suficientemente cortos, antes de llegar a las velocidades límites, las velocidades que se alcanzan son distintas para cada partícula. La más densa va primero que la menos densa en el mismo periodo de tiempo y llegará primero a cualquier obstáculo que se interponga, y la partícula más densa alcanzará más pronto la velocidad límite y sedimentará primero. Este criterio se usa en los clasificadores hidráulicos.

Aparatos utilizados en la separación hidráulica

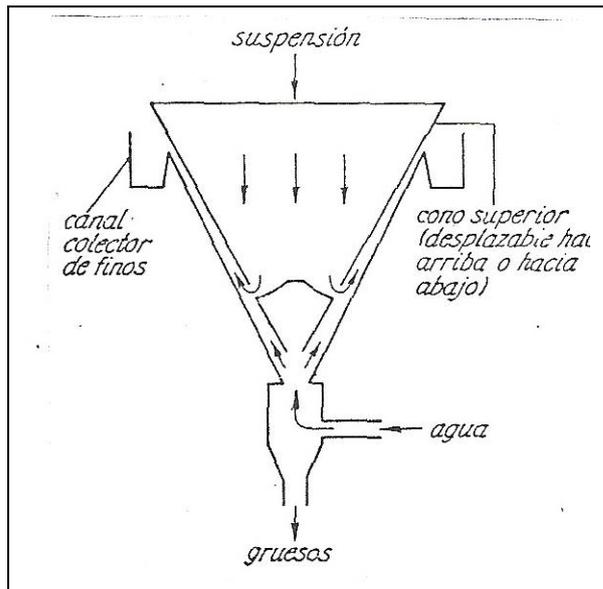
a) Cajas clasificadoras: están constituidas por un recipiente dividido en varios compartimientos por tabiques de poca altura que parten del fondo. La caja se alimenta por la parte superior con una corriente horizontal continua. Las partículas sedimentan de acuerdo a su densidad y a su tamaño y se recogen en el fondo de los compartimientos.



b) Cajas piramidales: consisten en varias cajas con fondo piramidal con una salida, conectadas una a continuación de la otra. Cada caja es mayor que la que le precede. La corriente de alimentación es horizontal y continua y se produce la separación de la misma forma que en la caja clasificadora. Este equipo permite una operación continua ya que los sólidos sedimentados se extraen por la parte inferior de cada cono.



c) Separador de cono sencillo: consiste en un cono invertido. Por la parte superior se agrega la suspensión mientras que por la parte inferior se agrega agua en contracorriente con lo cual se produce el arrastre de los finos y los gruesos caen al fondo desde donde se separan.



d) Separador de cono doble: es similar al anterior pero tiene un segundo cono interior el cual se puede mover variando la separación entre los dos conos, y de esta forma se varía la velocidad de circulación del agua permitiendo adaptar el equipo a distintas condiciones de sedimentación sin variar el caudal de agua.

e) Elutriador: constituye la materialización del concepto de separación por corriente de fluido: Consiste en un tubo vertical a través del cual pasa líquido a una velocidad

específica y por la parte superior se carga la mezcla de sólidos. Las partículas grandes cuya velocidad de sedimentación es mayor que la velocidad de flujo ascendente, se recogen en el fondo mientras que las finas son arrastradas y se introducen como carga en un segundo cilindro de mayor sección transversal y así sucesivamente.

f) Clarificador rectangular: En algunas aplicaciones donde se necesita sedimentar sin tener que clasificar los sólidos se usan equipos parecidos a las cajas que aplican el mismo principio pero carecen de tabiques. Los sólidos depositados se barren con una serie de aletas raspadoras impulsadas por un mecanismo sin fin que llevan los sólidos hasta un extremo del recipiente en donde se extraen generalmente por aspiración o bien por bombeo. Las aletas realizan el camino de retorno al otro extremo sobre la superficie del agua en algunos equipos mientras que en otros lo hacen bajo el agua. Se pueden consultar otros equipos en la bibliografía

FLOTACION

La flotación utiliza para separar sólidos las distintas propiedades superficiales de las sustancias.

Si se colocan dos sustancias A y B finamente divididas en agua y se agrega una corriente de aire la más hidrófila estará totalmente mojada y sedimentará. La menos hidrófila no estará totalmente mojada y formará un sistema trifásico (sólido B-aire-agua) de densidad menor que el agua y flotará como espuma.

Se trata de un fenómeno superficial que requiere una elevada superficie específica, por lo que tanto el sólido como el aire conviene introducirlos al equipo finamente divididos. El carácter más o menos hidrófilo depende del ángulo de contacto que forme el líquido con el sólido en la interfase aire-sólido, mientras más grande sea este ángulo menos hidrófilo será el sólido (el líquido tiene poca capacidad de extenderse sobre su superficie y cubrirlo).

Reactivos de flotación:

Para mejorar los rendimientos y en ciertas ocasiones facilitar la flotación diferencial se agregan pequeñas cantidades de ciertos reactivos, que de acuerdo a su función se clasifican en:

a) Espumantes: se utilizan para evitar que las burbujas de aire se unan al alcanzar la superficie del líquido y se destruya la espuma. Son sustancias poco solubles no ionizables, que disminuyen la

tensión superficial del agua en la interfase aire-agua que limita la burbuja y producen espumas persistentes. Se utilizan alcoholes alifáticos relativamente pesados, como el hexílico y aceites esenciales de pino y eucalipto.

b) Colectores y promotores: son adsorbidos por la superficie del sólido a flotar sobre la que forman capas muy finas que modifican su mojabilidad. Los colectores parece ser que se adsorben formando una capa monomolecular mientras que los promotores lo hacen en capas de mayor espesor. Se usan xantogenatos (NaS.CS.OR), aerofloats (HS.PS.(OR)₂) y tiocarbanilida.

c) Reactivos modificadores: Adsorbidos sobre la superficie del sólido modifican las propiedades de esta y con ello su afinidad natural para la fijación del colector o promotor. Se utilizan SO₄Cu para añadir a los minerales de Zn, también se usan los sulfuros alcalinos y cianuros. Los agentes modificadores no actúan siempre por adsorción: a veces se dan acciones puramente químicas como en el caso del sulfato de cobre y el sulfuro de zinc.

La temperatura favorece la acción de los reactivos de flotación, lo cual a elevadas temperaturas resulta desfavorable pues junto con el material a separar con la espuma también se separan impurezas y gangas en el caso de la minería.

Aparatos para la flotación

En general son de régimen continuo y se denominan células de flotación. Estas células reciben la alimentación compuesta por los sólidos, agua, y los reactivos perfectamente mezclados. La fracción que flota se separa como espuma y la que no flota continúa en suspensión y abandona el aparato. Estos son básicamente de dos tipos:

a) Células neumáticas: La suspensión penetra por la parte inferior de la célula y la atraviesa longitudinalmente. En el fondo hay un tubo perforado que produce la aireación necesaria. La espuma formada se recoge en la parte superior por desborde a canaletas laterales que recorren la célula. La suspensión con el material no flotante sale por la parte inferior y recorre una salida de flujo dividido en la cual la corriente superior arrastra los finos y la inferior extrae los gruesos. El tubo inferior tiene el problema que se tapan los orificios, para evitarlo se usa un tubo que gira alrededor de su eje longitudinal, al cual se agregan aletas para agitar la suspensión y evitar el taponamiento. Estos equipos son relativamente antiguos.

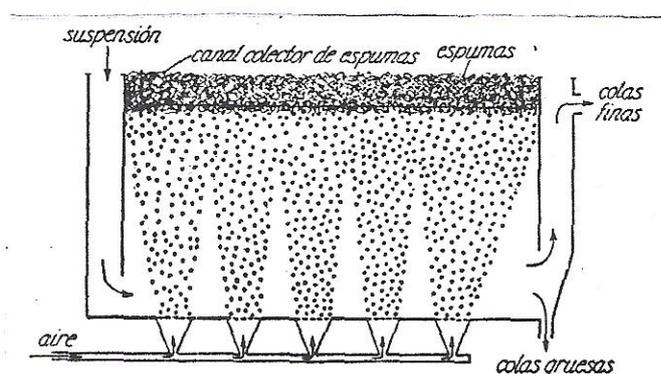


Fig. 1.5.—Vista esquemática, en sección longitudinal, de la célula de flotación de CALLOW.

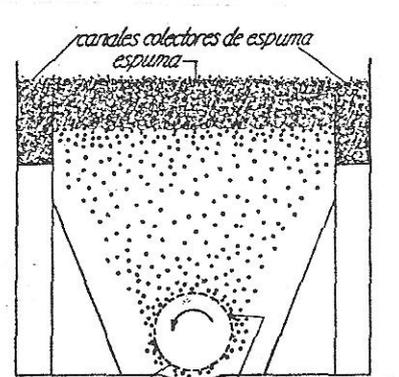
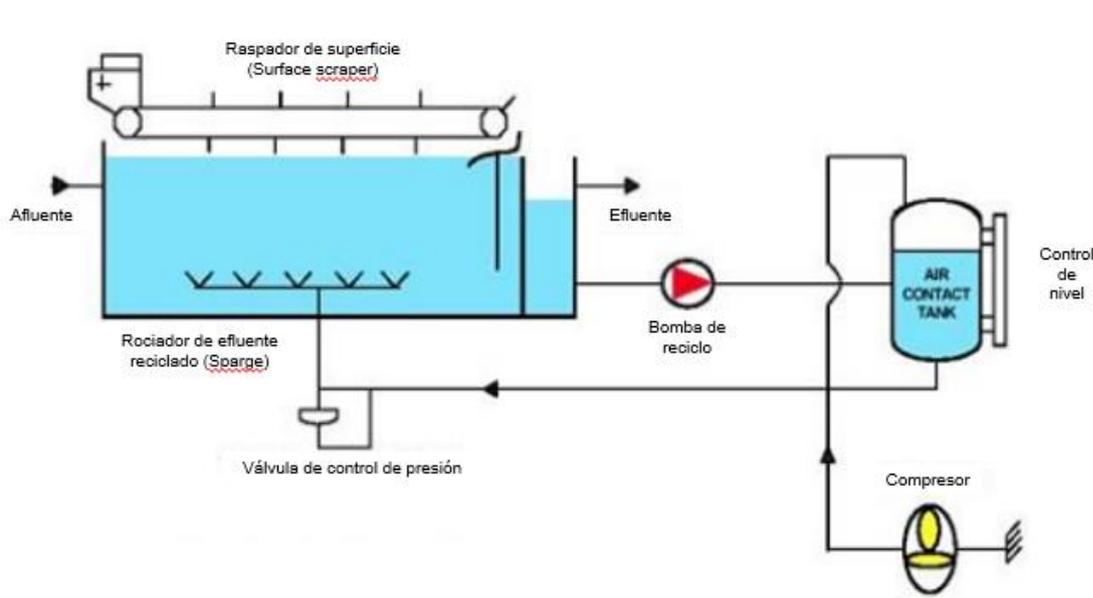


Fig. 2.5.—Sección transversal, esquemática, de la célula de flotación CALLOW-McINTOSH.

b) Células mecánicas: estas células están provistas de agitadores rotatorios que pueden actuar como aspiradores-inyectores de aire. En otros casos el aire ingresa por separado. Los agitadores producen, además del ingreso del aire, un mezclado importante de la suspensión y ayudan a evitar la sedimentación.

Estos equipos se usan más que los anteriores.

c) Otros equipos producen la espuma por desprendimiento del aire disuelto en el líquido al ingresar éste a una cámara de vacío o bien a la atmósfera. Estos se usan en la industria del petróleo



En este sistema el aire es disuelto hasta saturación en el agua residual bajo una presión entre cuatro y seis atmósferas, seguido de una descompresión a presión atmosférica. Cuando la presión del líquido disminuye, el gas disuelto en exceso es liberado en forma de finas burbujas, a lo largo de toda la masa del líquido.

La separación requiere varias células pero no distribuidas en serie, sino por grupos de manera que cada uno desarrolle una función distinta en el conjunto tales como concentrado inicial (desbastadoras) y concentrado final (refinadoras). A veces se agrega otro grupo más para aumentar la ley del concentrado.

FILTRACION

Introducción

Se entiende por filtración a la operación por la cual se separan los sólidos finamente divididos de los fluidos en cuyo seno están suspendidos, utilizando una superficie permeable a los fluidos.

El fluido puede ser un líquido o un gas.

Generalidades

Para efectuar la filtración hace falta un **líquido turbio** y un **materias filtrante** para retener el **precipitado** y dé un **filtrado** libre de sustancias sólidas en disolución.

El estudio de la filtración tiene la siguiente finalidad:

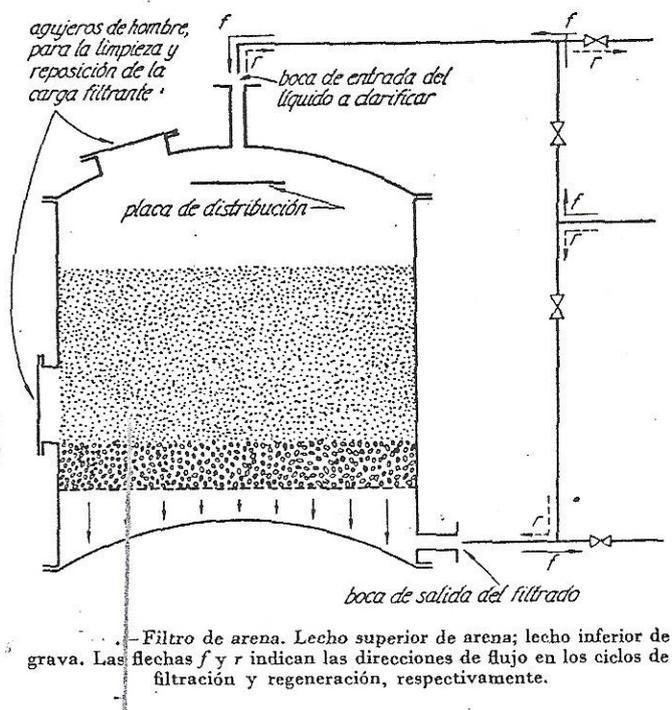
- a) poder decidir razonablemente el tipo de filtro más adecuado
- b) dimensionar ese filtro
- c) establecer las condiciones de ejecución de las operaciones de filtrado y de lavado
- d) poder predecir con suficiente exactitud el resultado que se ha de obtener si se cambian las condiciones de filtración.

En principio podría suponerse que el material filtrante retiene los sólidos como si actuara como un tamiz, o sea que solamente quedan retenidos los sólidos con dimensiones mayores que el tamaño de poro del filtro. Se puede obtener un líquido claro utilizando un tamaño de poro mayor que el del sólido a separar mediante la formación de una torta de filtrado es decir aprovechando al propio precipitado como medio filtrante. Esto se debe a que los poros del material filtrante quedan parcialmente bloqueados por el precipitado, y pasados los primeros instantes de filtración ya no es el medio filtrante el que determina las cualidades de la separación sino el propio precipitado. Se forma una torta a través de la cual debe pasar el líquido para lo que hay que ejercer cierta presión para vencer la resistencia de la misma.

A pesar de esto es muy importante elegir correctamente el material filtrante. Se debe tener en cuenta el estado físico del material filtrante, naturaleza química y estado superficial. El medio filtrante debe retener el precipitado pero sin que ello cierre el paso a los líquidos, para lo cual es conveniente que las partículas formen puentes a través de los poros. Estos materiales deben presentar pequeña resistencia al flujo, buena resistencia mecánica, ser químicamente inertes, buena resistencia al desgaste y una superficie suficientemente lisa como para separar el precipitado. Se emplean como medios filtrantes materias granulares tales como arena, grava, tierras de distinta naturaleza, polvo de carbón, de amianto, tejidos vegetales o metálicos, placas sinterizadas, etc.

Tipos de filtros

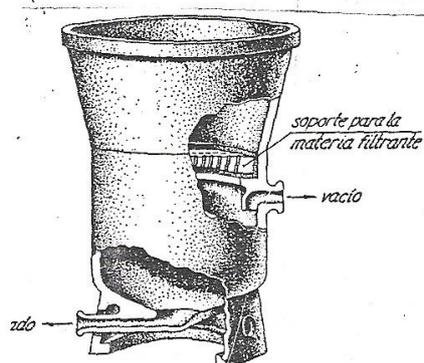
Para que el precipitado atraviese la torta y el medio filtrante se debe ejercer una presión que venza esa resistencia. De acuerdo a la forma de aplicar esa presión los filtros se pueden clasificar en:



a) Filtros de gravedad: la presión es la derivada de la carga hidrostática del líquido sobre el medio filtrante. Consiste en un depósito de doble fondo, el primero de los cuales es perforado. Sobre éste se coloca el material filtrante que es una serie de capas de arena de distinta granulometría, aumentando ésta desde arriba hacia abajo; siendo la inferior de canto rodado o pedregullo que evita la pérdida de la arena superior. El líquido se desplaza por gravedad a través del material filtrante. Son de bajo rendimiento y se usan para filtrar grandes volúmenes de líquido con pocas impurezas, tal como ocurre en la producción de agua potable. Estos filtros se deben lavar periódicamente en contracorriente para desobstruir la arena. En algunos casos se utiliza carbón en lugar de arena como medio filtrante y se

agregan al líquido sustancias coagulantes tales como el sulfato de aluminio que hacen que las partículas difíciles de retener por el lecho sean adsorbidas por éstas que a su vez son fácilmente retenidos por el filtro.

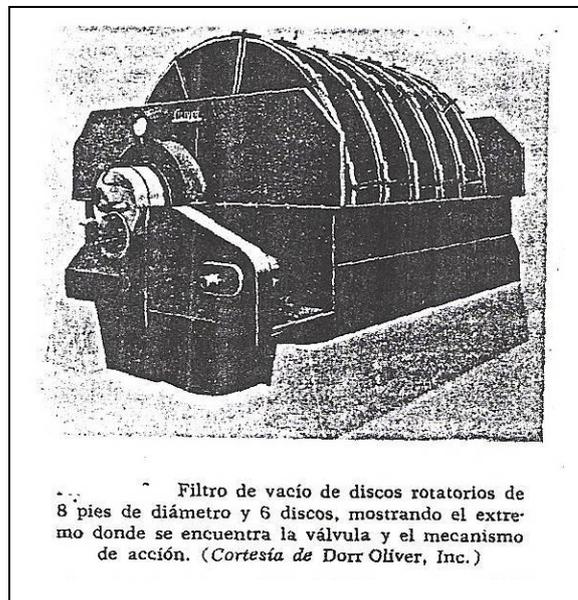
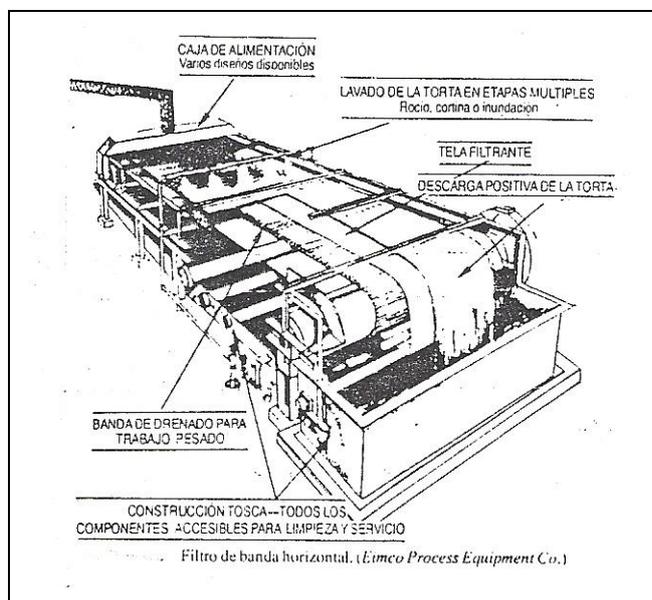
b) Filtros de vacío: funcionan aplicando una succión en el lado opuesto del material filtrante. Pueden ser discontinuos o continuos.



.- Filtro de nucha, construido en gres (de CUCURNI, S. A., Barcelona).

b1) Filtros discontinuos: entre estos están los filtros tipo Nutsch que es esencialmente un recipiente dividido por un tabique paralelo a las bases. En parte superior se coloca la solución turbia y en la inferior se realiza el vacío y se recoge el filtrado. El tabique es poroso y puede actuar como elemento filtrante o sobre el cual se coloca éste. La torta se forma sobre el tabique o sobre el medio filtrante. También se incluyen en este tipo los filtros para laboratorios.

b2) Filtros continuos: son de amplia aplicación en la industria de procesos continuos. El filtro está formado por un cilindro de eje horizontal rotatorio o un disco rotatorio horizontal o varios discos verticales con un eje común, que se sumerge parcialmente en el recipiente que contiene el líquido turbio. En este recipiente se produce inyección de aire para mantener la suspensión homogénea. En caso del filtro de disco horizontal el líquido turbio se agrega directamente sobre la superficie filtrante mediante una cañería. El cilindro o el disco generalmente está construido con malla de alambre que recibe el material filtrante en una cara (puede ser interna o externa) mientras que en la otra cara se realiza el vacío. Están divididos en compartimientos que determinan varias zonas: zona de filtración, zona de escurrido, zona de lavado, zona de desecado y zona de limpieza.



La zona de filtrado se sumerge en el líquido turbio, se aplica la succión y se forma la torta correspondiente. Luego pasa a la zona de escurrido donde se extrae el líquido que pudiera haber quedado en la torta. En la zona de lavado se lava la torta para extraer las impurezas y en la zona de secado se extrae el resto de líquido de lavado y se seca. Luego pasa por la zona de limpieza donde un elemento separa la torta del soporte y la descarga en un recipiente. Este elemento de separación puede ser una cuchilla en el caso de un filtro Oliver de tambor o Wolf, o un tornillo sin fin en un filtro de disco circular. En algunos filtros se agrega un equipo para reponer el elemento filtrante que se pierde o se daña. Se puede variar la superficie de filtrado modificando la inmersión del tambor o

del disco y el espesor de la torta modificando la velocidad de rotación. Los filtros rotatorios continuos tienen gran aplicación en aquellos casos en que se precisa un gran volumen de producción. Necesitan escasa mano de obra y pueden utilizarse para filtrar líquidos con gran cantidad de sólidos siempre y cuando esto no dificulte la formación de una torta adherente. La formación de esta torta es difícil cuando el sólido es de tamaños muy distintos. En este caso se vierte el líquido sobre la parte superior del tambor. No son aptos para precipitar líquidos turbios con poco precipitado o precipitados gelatinosos. Además trabajan con presiones del orden de fracciones de atmósfera, lo que dificulta el filtrado a través de tortas gruesas o muy compactas

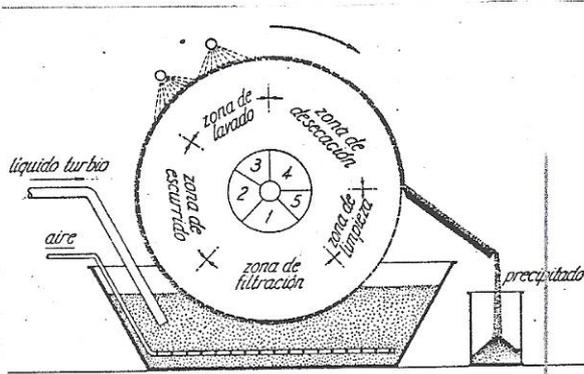
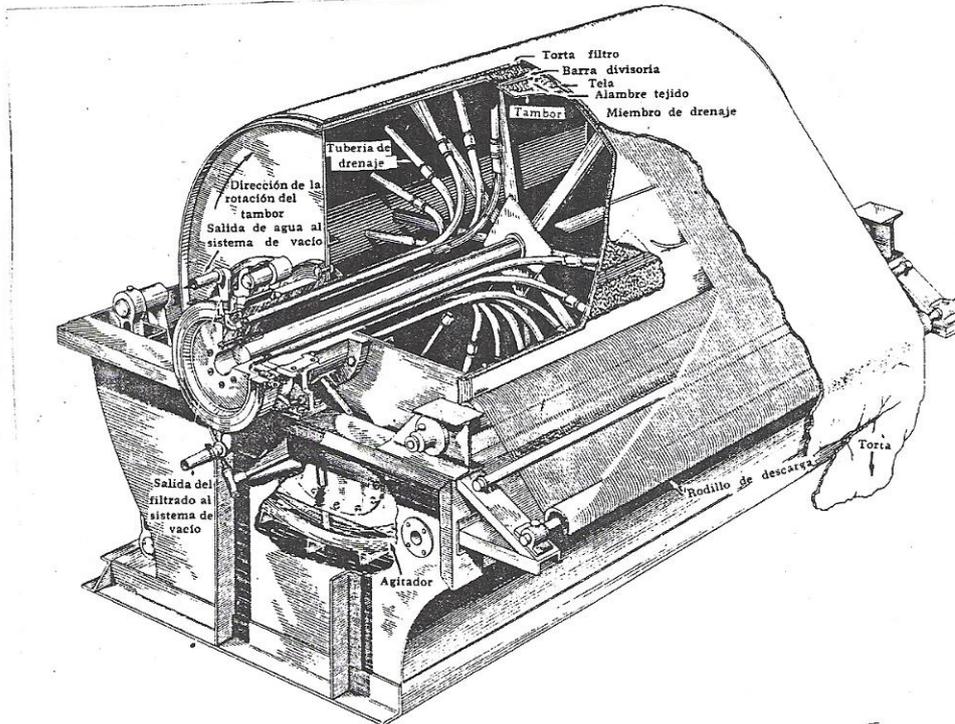
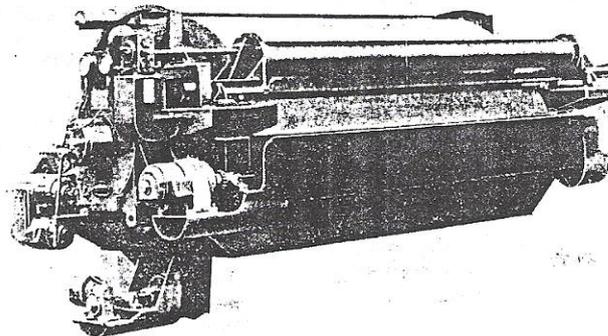


FIG. 14-3. - Vista esquemática de un filtro rotatorio, de vacío.



Dibujo esquemático de un filtro de vacío, de tambor rotativo y descarga de cadena.
 (Cortesia de Filtration Engineers Division, American Machine and Metals, Inc.)



Filtro continuo, de vacío, de 5 pies 3 plg de diámetro, 8 pies de superficie.
 (Cortesia de Dorr-Oliver, Inc.)

FACULTAD DE INGENIERIA UNCUYO
 CATEDRA OPERACIONES UNITARIAS
 SEPARACIÓN DE FASES POR MECANICA DE LOS FLUIDOS

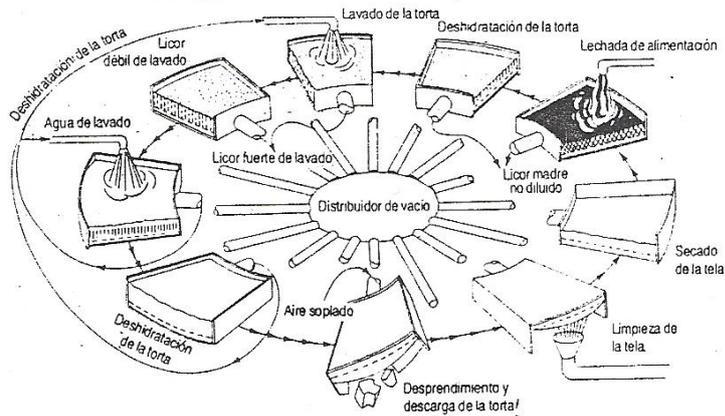
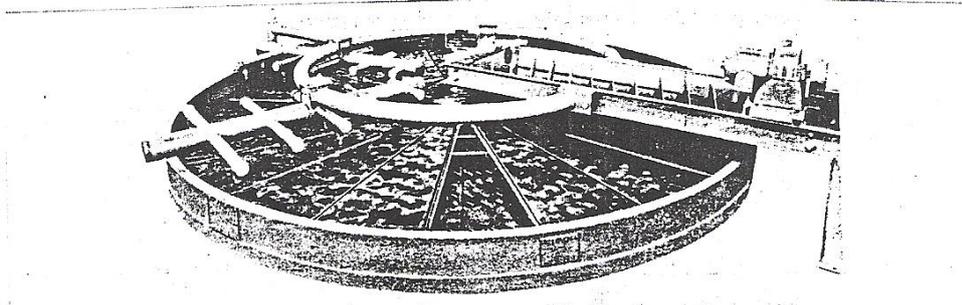


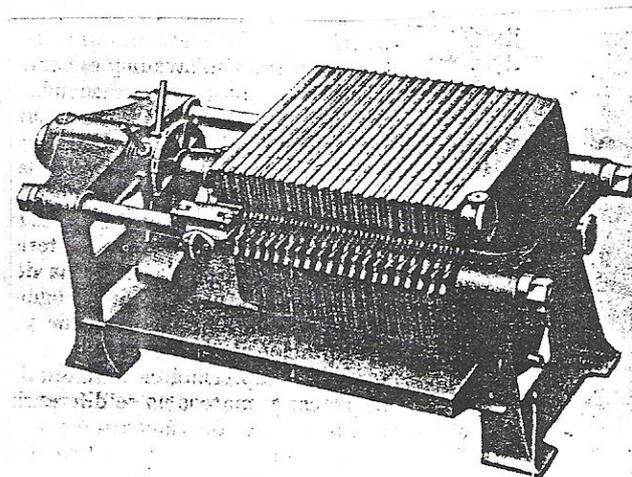
Diagrama esquemático que ilustra el ciclo del filtro de pailas inclinables Bird-Prayon. (Bird Machine Co.)



Filtro de vacío rotatorio horizontal, que muestra la disposición de la tubería para los dos pasos de lavado y el mecanismo de desprendimiento de la torta. Una sección del medio filtrante se ha quitado para ilustrar el soporte de la cubierta y el declive de drene. (Cortesía de Dorr-Oliver Inc.)

Rodillo de descarga

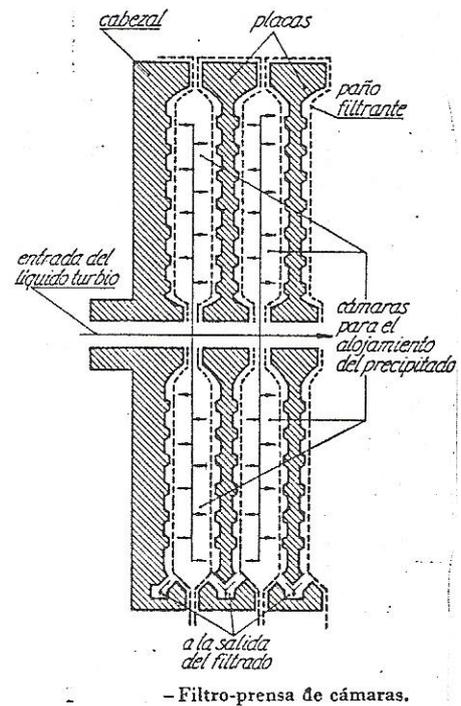
c) Filtros de presión: funcionan aplicando presión sobre el líquido a filtrar. Los principales son los filtros prensas. Pueden ser de cámaras o de placas y marcos.



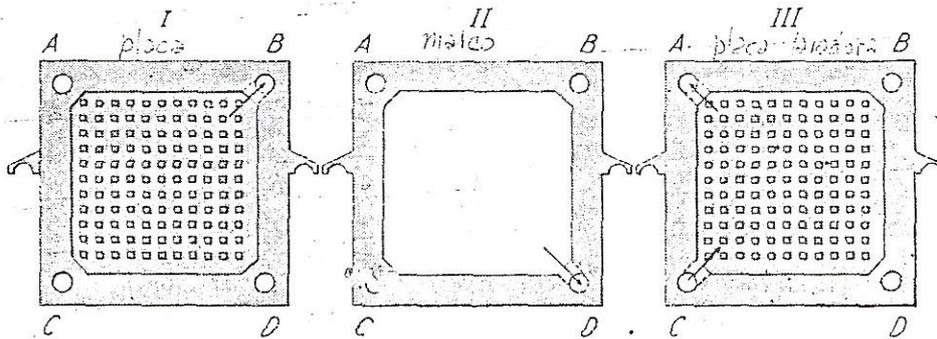
Fotografía de un filtro-prensa.

c1) Filtros de cámara: estos filtros están constituidos por el acoplamiento de varias placas cóncavas entre las que se coloca el paño filtrante. El cierre del sistema se consigue aplicando presión mediante un tornillo sobre la primera placa o cabezal. El líquido turbio llega impulsado por una bomba no

pulsante, penetra a las cámaras por la parte central, atraviesa el material y sale por una serie de escotaduras o ranuras. Una vez formada la torta se reemplaza el ingreso de líquido turbio por agua o solución de lavado que sigue el mismo camino que el líquido turbio. Terminado el ciclo de filtrado, lavado y escurrido se abre el equipo y se extrae la torta.



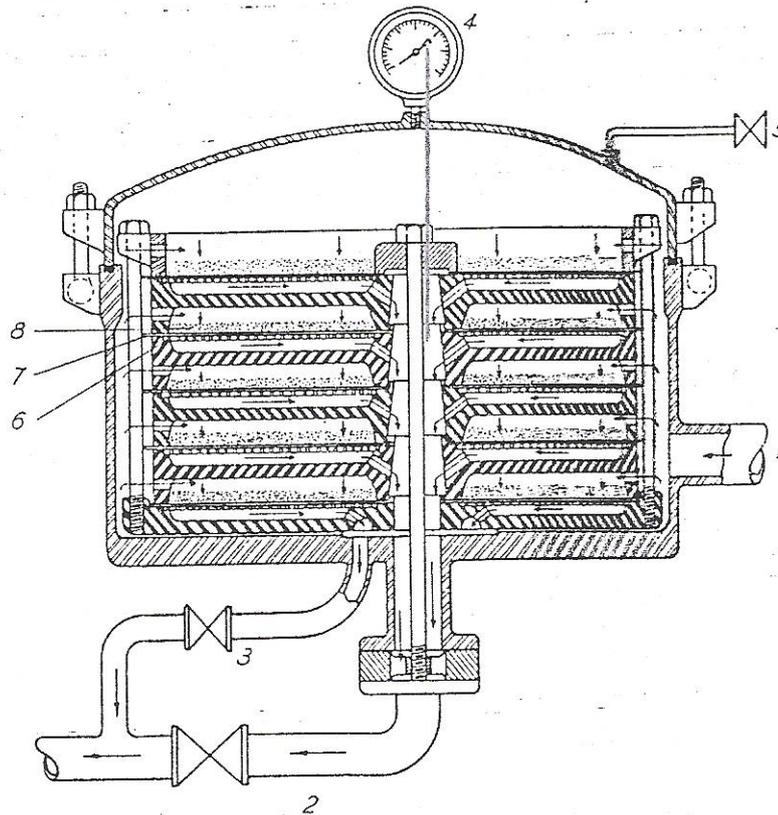
c2) Filtros prensa de placas y marcos: tienen la misma característica que los anteriores pero al poseer marcos entre las placas lo cual permite obtener tortas de mayor espesor. Estos filtros permiten lavar el precipitado en la misma forma que los anteriores, pero el lavado es defectuoso debido a las irregularidades que presenta la torta y a que el líquido de lavado penetra por la parte central de la torta y divide el flujo hacia ambas placas filtrantes. Cuando se requiere un lavado adecuado de las mismas se utiliza un filtro ligeramente distinto: al conjunto placa-marco se le añade un tercer elemento que es la placa lavadora.



- Placas I, II y III de un filtro-prensa.
 A, canal de salida del filtrado; B, canal de salida del filtrado o del líquido de lavado; C, canal de entrada del líquido de lavado; D, canal de entrada del líquido turbio.

c3) Filtros prensa de placas y marcos con placas lavadoras: Estos filtros están constituidos por tres elementos que se repiten que son: placa de filtración, marco y placa de lavado. Todas las placas poseen salidas para el filtrado y para el líquido de lavado. El líquido turbio penetra por los marcos y sale por la placa filtrante, mientras que el líquido de lavado entra por la placa correspondiente y sale por la de filtrado (se efectúa un lavado en contracorriente de la torta y se atraviesa todo el espesor de la misma aplicando el líquido sobre una cara). Una vez escurrida la torta se abre y se extraen el precipitado. Las características constructivas de los filtros varían de acuerdo al diseño del fabricante agregan canales separados para el líquido turbio, filtrado, lavado y lavado sucio. Estas salidas poseen válvulas que permiten realizar la extracción del filtrado y del líquido de lavado en forma independiente.

c4) Filtro de caja o de placas horizontales: son una variante de los filtros anteriores donde los elementos filtrantes (placas) están ubicados dentro de una caja en sentido vertical. El filtrado se recoge en un tubo central y luego se lo hace pasar por una última placa para separar las impurezas que hubieran quedado.



— Filtro SPARKLE.
 1, entrada del líquido turbio; 2, salida de filtrado; 3, salida independiente para el filtrado del plato inferior (de agotamiento); 4, manómetro; 5, purga de aire; 6, plato perforado (soporte del material filtrante); 7, material filtrante; 8, torta de precipitado.

Todos estos filtros se cierran efectuando presión sobre las placas y marcos en sentido longitudinal mediante dispositivos mecánicos (tornillo) o hidráulicos.

c5) Filtro de hojas: Este filtro está constituido por un recipiente cerrado a presión que recibe el líquido turbio. Dentro de este recipiente se colocan hojas verticales porosas conectadas en su parte inferior a un tubo que recibe el filtrado y lo extrae del equipo. La torta se forma sobre la cara externa de la hoja mientras que el filtrado recorre la hoja longitudinalmente hasta el tubo colector.

Estos filtros se usan cuando los precipitados filtran mal y es necesario aplicar presión y aún calentar cuando para disminuir la viscosidad. También se emplean cuando el contenido de sólidos es muy importante y cuando se manejan líquidos volátiles que no conviene perder. También son ideales para realizar un lavado exhaustivo de la placa y para recuperar el soluto que se extrae con el líquido de lavado. Los filtros de caja permiten efectuar un mejor lavado de la torta aún con líquidos calientes.

Como desventaja tenemos que no permiten el funcionamiento continuo, requieren mucha mano de obra para su desarme y tienen tiempos muertos muy elevados por lo que para operaciones continuas se necesitan colocar varias unidades en paralelo. A pesar de estas desventajas se usan mucho.

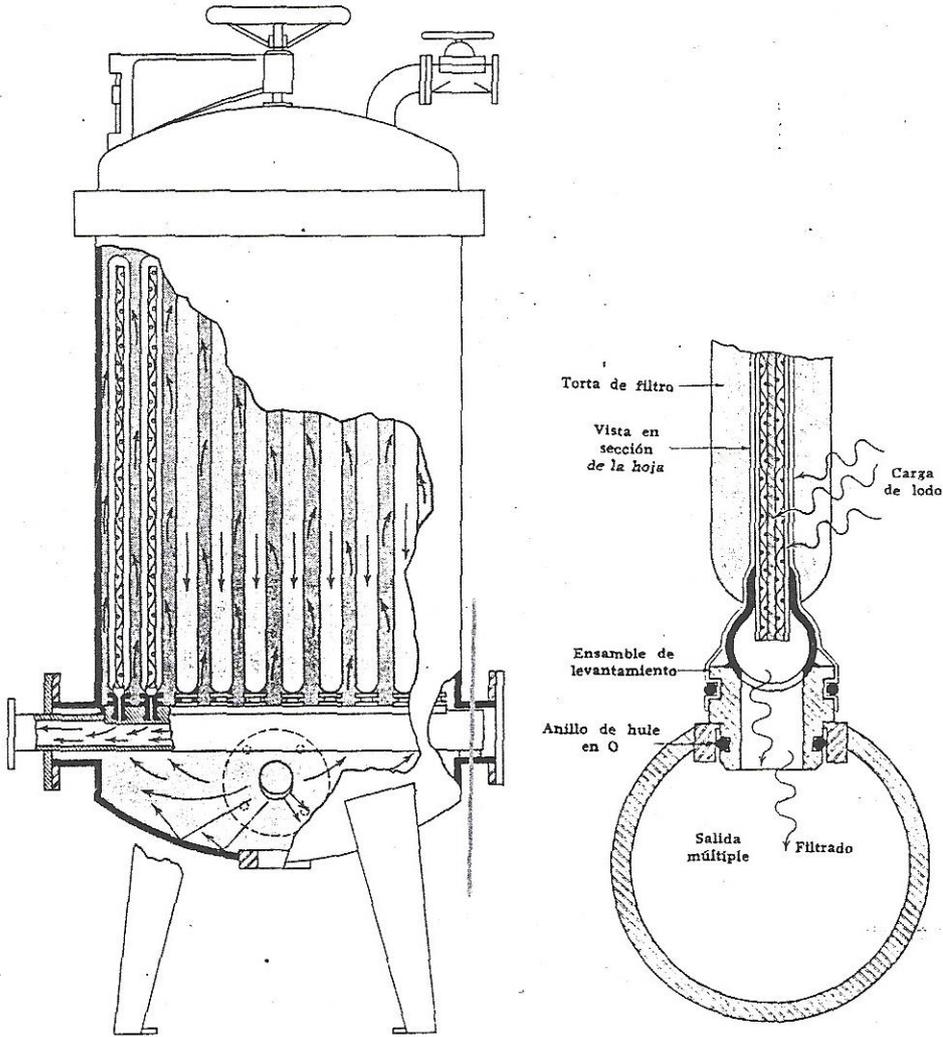


FIG. 19-17 Vista del corte de un filtro de hojas vertical, y diagrama seccional que muestra la construcción de la hoja filtrante. (Cortesía de Industrial Filter & Pump Mfg. Co)

d) Filtros centrífugos: utilizan la fuerza centrífuga para aplicar presión. Se utilizan cuando la cantidad de sólidos es muy alta o muy chica. En el primer caso se llaman escurridores o hidroextractores y se utilizan en la industria textil para el escurrido de las telas o en la industria azucarera. En el segundo caso se llaman clarificadores. Pueden ser centrífugas de eje horizontal o vertical; continuas o discontinuas.

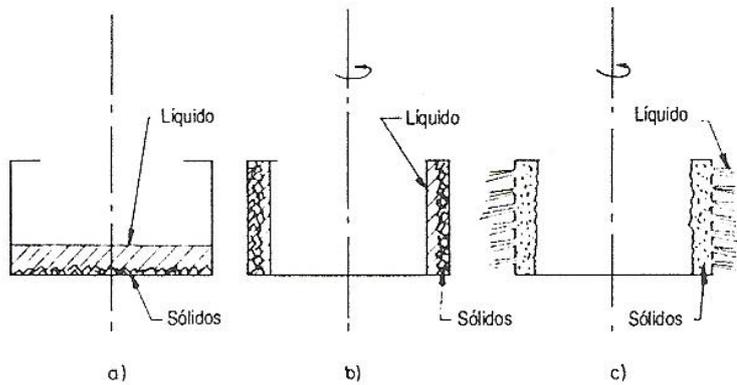
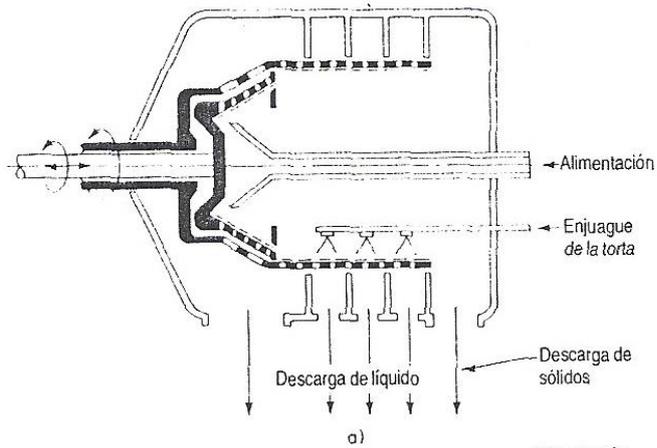
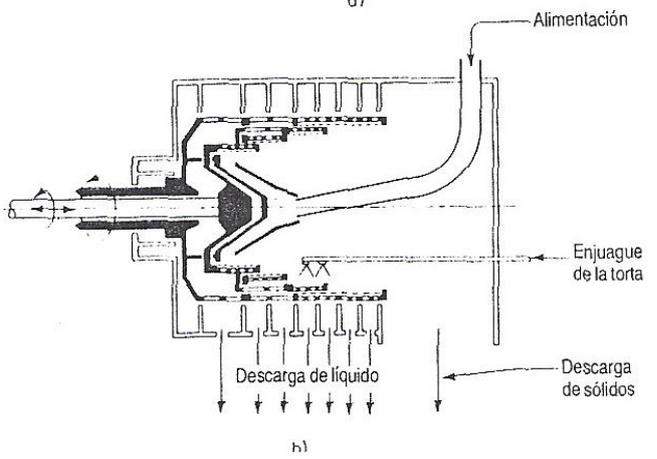


FIG. 19-117 Principios de filtración y separación centrífuga. a) Recipiente estacionario. b) Sedimentación en recipiente giratorio no perforado. c) Filtración en cesto giratorio perforado.

FACULTAD DE INGENIERIA UNCUYO
CATEDRA OPERACIONES UNITARIAS
SEPARACIÓN DE FASES POR MECANICA DE LOS FLUIDOS



a)

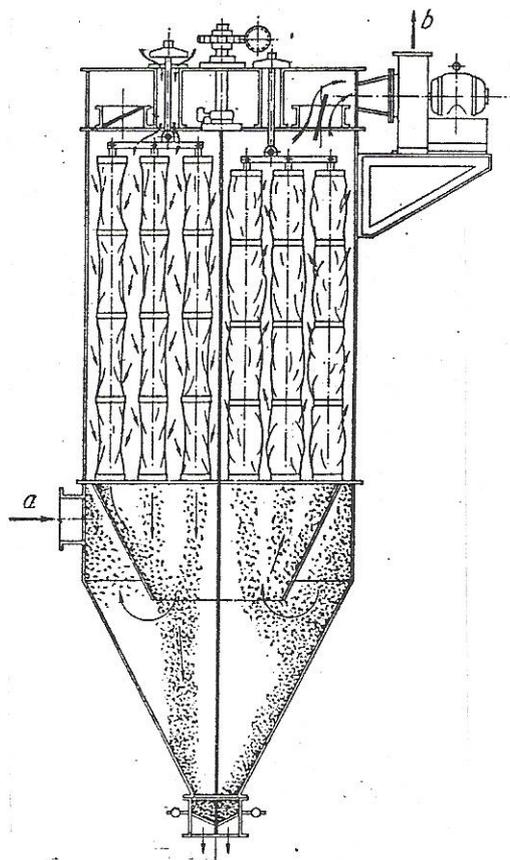


b)

e) Otros tipos de filtros: cuando se desea filtrar una corriente de aire se puede utilizar un filtro de mangas que consiste en un conjunto de tubos de tela encerrados dentro de una caja. El aire sucio ingresa por la parte inferior de la caja, ingresa dentro del tubo de tela, atraviesa la tela y sale de la caja. Las paredes del tubo actúan como pared divisoria entre la zona de aire sucio y limpio. El polvo queda adherido a la tela. Para evitar que se tape se sacuden periódicamente y el polvo se recoge en una tolva inferior.

Cuando se tiene que separar sólidos gruesos tales como trapos, trozos de vidrio, piedras, etc. se recurre a un tamiz formado por barras metálicas o de un material inerte que los retiene. Las partículas más finas atraviesan por los orificios de la malla y luego pueden ser retenidos en tamices de abertura menor. Se utilizan para una separación gruesa de sólidos que pueden producir averías o mal funcionamiento de otros equipos.

Hay filtros que utilizan fuerzas eléctricas o magnéticas o bien combinan estas con los principios de separación de la Mecánica de los Fluidos para mejorar la calidad de la separación o aumentar su especificidad.



— Filtro de mangas para gases.

Coadyuvantes para la filtración (ayudafiltros)

Los precipitados de carácter granular y que no se apelmazan por la aplicación de la presión se filtran sin problemas. En cambio los de carácter gelatinoso o coloidal dificultan la filtración. Para aliviar estos inconvenientes se emplean coadyuvantes. Tienen la característica de sólidos granulares de alta resistencia mecánica, cuyo peso específico varía muy poco cuando se lo comprime. Estos sólidos poseen una gran energía superficial específica. En la práctica es más fácil filtrar en este tipo de lechos debido a que su porosidad es mayor que los de baja energía superficial específica. Al ser muy fuerte la unión puntual entre las partículas, los lechos resultarán insensibles a la presión. Por otra parte la elevada energía superficial mantendrá a las partículas del precipitado unidas al lecho. Se puede utilizar como coadyuvante tierra de diatomeas o kieselghur, que está compuesta por esqueletos silíceos de algas marinas, bentonita, carbonato de calcio precipitado, mármol molido, coque, etc.

El coadyuvante se usa de dos formas o bien se mezcla con el líquido turbio, para filtrarlo conjuntamente con el filtrado o se deposita previamente sobre el material filtrante ya sea depositándolo o bien filtrando una solución de agua y coadyuvante. Este último procedimiento se usa cuando se tiene que obtener una torta de filtrado sin contaminación. Se utiliza tierra de diatomeas, carbón activado, arcillas activadas que actúan como decolorantes, carbón vegetal, tierras de distintos tipos, bagacillo, etc. Los carbones activados y las arcillas activadas se usan más como decolorantes que como ayudafiltros.

Régimen de filtración

Se puede realizar la filtración a presión constante, a velocidad constante y combinando ambas técnicas.

La filtración a presión constante se realiza cuando se filtra un líquido turbio que forma una torta apenas sensible a la presión. La presión se mantiene constante durante todo el proceso de

filtrado, lo que implica que la velocidad ha de ir disminuyendo paulatinamente, pues a medida que crece el espesor de la torta aumenta la resistencia.

La filtración a velocidad constante se emplea cuando el precipitado está constituido, total o parcialmente, con sustancias sensibles a la presión y no se emplea la cantidad suficiente de coadyuvante. Trabajando en régimen de velocidad constante se comienza a filtrar a pequeña presión y, a medida que va aumentando el espesor de la torta se va elevando la presión para compensar el aumento de resistencia del filtro y mantener constante el volumen de filtrado obtenido en intervalos iguales de tiempo.

La filtración mixta combina los dos métodos para armonizar las ventajas de las dos técnicas para dar solución a los precipitados sensibles a la presión. Se comienza a filtrar a velocidad constante, a poca presión, hasta que se ha formado un lecho suficiente sobre el material filtrante; después, se eleva la presión hasta el límite oportuno y se procede a presión constante.

Teoría y cálculos

En la filtración no es posible establecer las dimensiones de un filtro con la simple consideración de las características de las sustancias que intervienen sin realizar una etapa experimental.

También se pueden seguir métodos teóricos-experimentales para resolver el problema desde el punto de vista práctico.

Teoría de Karman

Esta teoría supone presión constante, continuidad en el flujo filtrado y régimen laminar. La velocidad de filtración se puede expresar como:

$$dV/d\theta = P/R \quad [M^3/T] \quad (1)$$

donde P = intensidad que provoca el fluido

R = resistencia = R₁+R₂ = res.torta + res.medio filtrante

Estas resistencias se pueden determinar por la ley de Darcy de flujo en medios porosos como

$$R_1 = \alpha_0 \mu (L/A) \quad \text{y} \quad R_2 = \beta_0 \mu (L_0/A)$$

donde: L espesor de la torta

L₀ espesor del medio filtrante

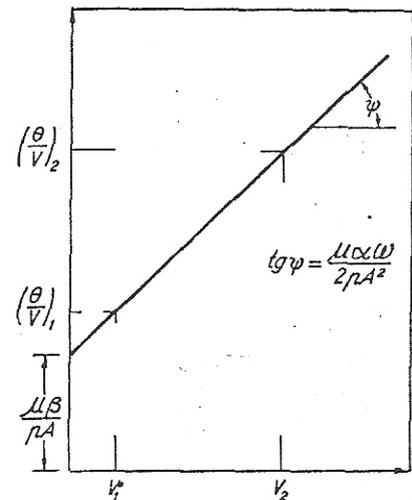
μ viscosidad del líquido

α₀ y β₀ coeficientes de proporcionalidad

L se puede expresar como L=KW/A (W = cantidad del precipitado)

$$R_1 = \alpha_0 \mu (L/A) = \alpha_0 K \mu (W/A^2) = \alpha \mu (W/A^2) \quad \text{donde} \quad \alpha = \alpha_0 K$$

$$R_2 = \beta_0 \mu (L_0/A) = \beta \mu /A \quad \text{donde} \quad \beta = \beta_0 L_0$$



Valoración gráfica de los parámetros de la ecuación de CARMAN (a presión constante).

Reemplazando en (1)

$$dV/d\theta = P^* \alpha \mu (W/A^2) + \beta \mu /A]^{-1}$$

reordenando y considerando $W=wV$

$$dV/d\theta = PA^2 * [\alpha \mu wV + \beta \mu A]^{-1} \text{ Ec. Karman referida al peso del precipitado}$$

Análisis de la filtración por la ecuación de Karman. Influencia de las distintas variables:

1) Espesor del precipitado: si se considera la velocidad de filtración por unidad de área

$$(1/A)(dV/d\theta) = PA [\alpha \mu wV + \beta \mu A]^{-1}$$

vemos que es directamente proporcional al área. Si se aumenta el área el segundo miembro será más grande luego conviene aumentar el área. Como inconveniente es que al aumentar el área a magnitudes muy altas se aumenta el costo del equipo y se complica el manejo de placas.

2) Líquido turbio: a mayor velocidad de formación de la torta hay menor resistencia específica. Conviene preconcentrar el líquido turbio para que la torta se forme rápidamente.

3) Influencia de la temperatura: la temperatura afecta directamente a la viscosidad. Si aumenta la temperatura disminuye la viscosidad y por ende aumenta $dV/d\theta$.

Aplicación de la ecuación de Karman al régimen a presión constante

Si se considera la ec. de Karman

$$dV/d\theta = PA^2 * [\alpha \mu wV + \beta \mu A]^{-1}$$

despejando $d\theta$

$$d\theta = (\alpha \mu wV/2PA^2)dV + (\mu \beta/PA)dV$$

Integrando

$$\theta = (\alpha \mu w/2PA^2)V^2 + (\mu \beta/PA)V \text{ luego}$$

$$\theta/V = (\alpha \mu w/2PA^2)V + (\mu \beta/PA) \quad (3)$$

Esta es la ecuación de una recta θ/V con ordenada al origen $\mu \beta/PA$ y pendiente $\text{tg}\Psi = \alpha \mu w/2PA^2$ fijando P y A podemos obtener α y β que son características de una filtración.

Volumen de coadyuvante ideal

Al agregar coadyuvante disminuye α , cuando se agrega mucho aumenta L y crece nuevamente θ .

Teoría del lavado del precipitado

Objetivo: prever velocidad del proceso (tiempo que tarda en pasar el volumen de lavado a través del precipitado. y determinar la cantidad del líquido necesaria para obtener una cierta concentración en las aguas de lavado.

Tipos de lavado:

a) por desplazamiento: el líquido lavador sigue el mismo camino que el filtrado y empuja el líquido madre retenido en la torta y lo desplaza. Se usa para los filtros de hojas y rotativos.

b) por difusión: el líquido lavador sigue distinto camino que el filtrado. La sustancia disuelta en el líquido madre se incorpora por difusión lenta al líquido lavador. Se necesita mayor volumen de líquido lavador. Este mecanismo se da en los filtros prensa.

Tiempo de lavado

Si α y β son constantes tanto en la filtración como en el lavado. La velocidad sale de la ecuación de Karman:

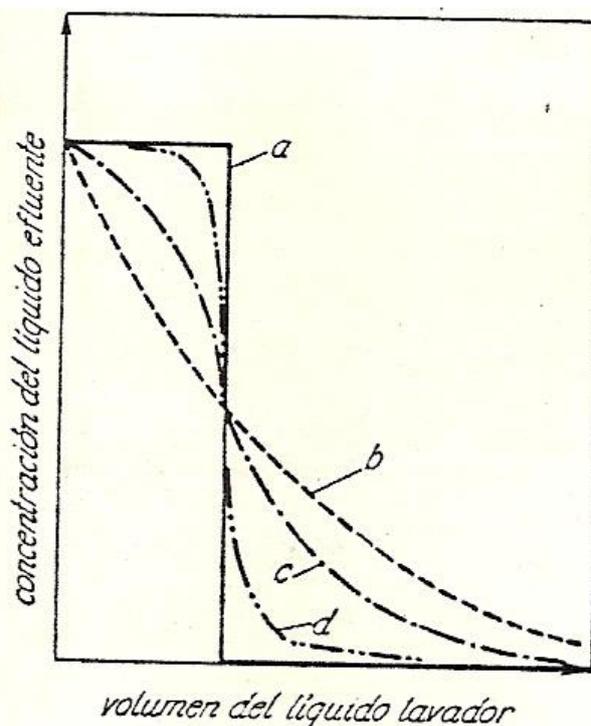
$$\begin{array}{l} \text{en desplazamiento} \quad V_{\text{lav}} = V_{\text{filtrado}} \\ \text{en difusión} \quad \quad \quad V_{\text{lav}} > V_{\text{filtrado}} \end{array}$$

Filtración con flujo tangencial

La filtración vista hasta ahora tiene la característica que los filtros operan en procesos de tiempo muerto. De ser así si se filtra a presión constante la velocidad de filtración disminuye con el tiempo. Esta reducción de velocidad se debe casi siempre a un aumento de la resistencia de la torta. Este efecto es más pronunciado cuando se filtran materiales muy finos, ya que el medio filtrante puede taparse. Se puede evitar esto agregando coagulantes al líquido turbio para incrementar el diámetro de la partícula que se desea retener.

Con el tiempo la limitación del crecimiento de la torta puede reducir la velocidad de filtración. Esto es una característica del filtrado en flujo directo al medio filtrante. Este inconveniente puede evitarse si se utiliza la filtración con flujo tangencial. En este proceso se utiliza una alta velocidad de circulación del líquido turbio, tangencial al medio filtrante con el objeto de minimizar la acumulación de partículas sólidas sobre la superficie del filtro. Esto permite operar como un proceso a régimen permanente. Las velocidades incrementadas de filtración que se obtienen con esta técnica permiten usar membranas de microporo o ultrafiltración, para la retención de partículas coloidales y/o diámetro micrométrico.

Ventajas :

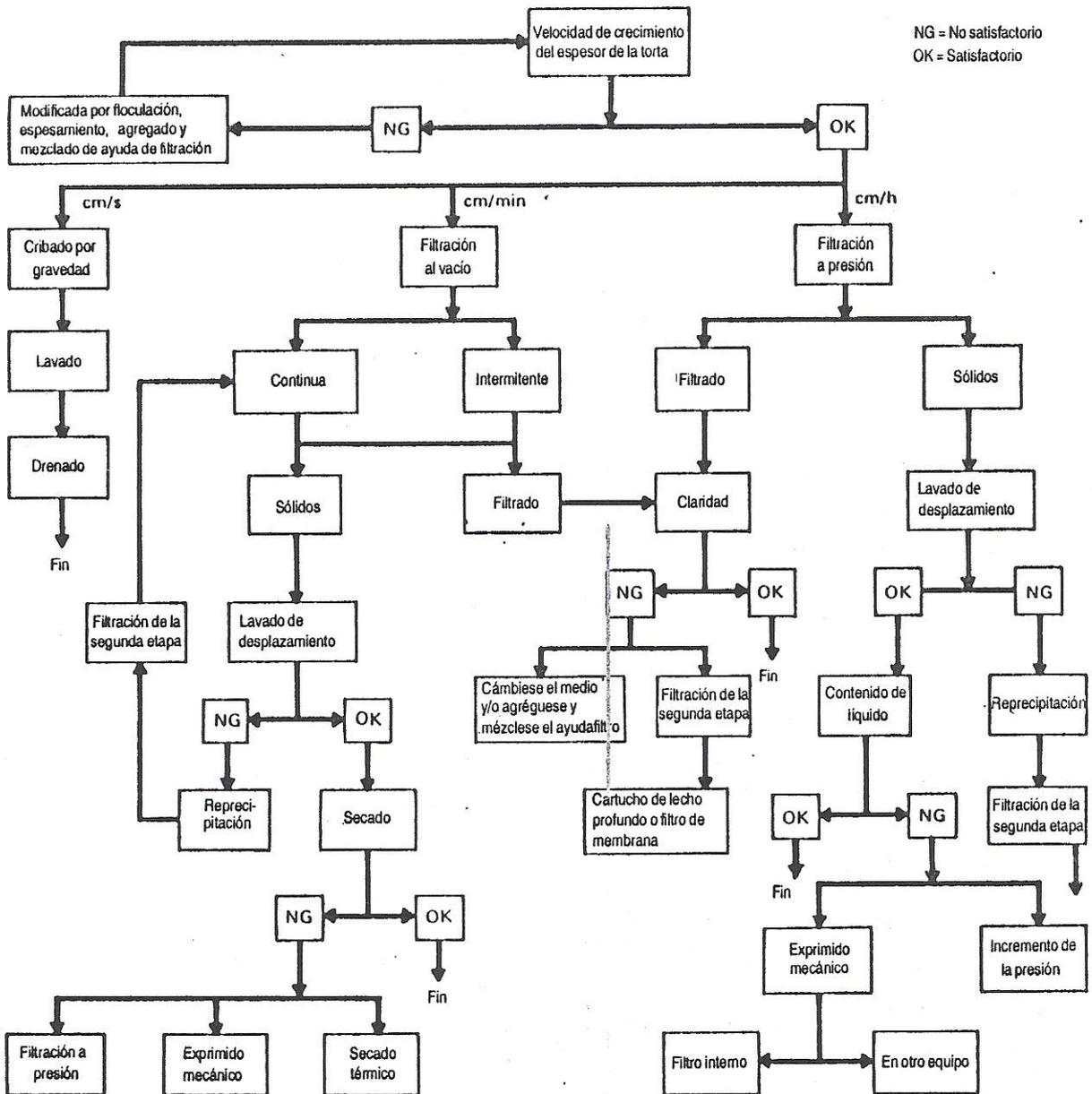


— La concentración de los líquidos de lavado en función del volumen de éste. a, lavado por desplazamiento (curva teórica); b, lavado por difusión (curva teórica); c, curva del lavado en filtro-prensa; d, curva del lavado en filtro de caja.

- a) Velocidad de filtración no se ve afectada en forma significativa por la diferencia de densidad en el medio de suspensión de partículas.
- b) La acumulación de partículas en la superficie del filtro se minimiza.
- c) No se requiere la alimentación de aditivos.
- d) No se requiere de ayudafiltro. Esto es importante cuando se desea contaminar lo menos posible el producto. La ventaja se obtiene a costa de mayor energía. Es necesario suministrar la energía de bombeo requerida para desplazar la suspensión en forma tangencial al medio filtrante, además de la energía necesaria para filtrar.

Modelo de desición para la resolución de un problema de filtración

De acuerdo a las características del material y a las consideraciones anteriores la resolución del problema del tipo y números de etapas de filtración se puede resumir:



Modelo de decisión para la resolución de un problema de filtración. [Tiller, Chem. Eng., 81(9), 118 (1974), con autorización.]

Bibliografía

McCabe-Thiele: Operaciones Unitarias de la Ing., Química
Vian-Ocón: Elementos de Ingeniería Química.
Perry: Manual del Ingeniero Químico 6 Ed.
Foust, Wenzel y otros: Principios de Operaciones Unitarias.
Brown: Ingeniería Química.