

# CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

## ASIGNATURA: EQUIPOS E INSTALACIONES INDUSTRIALES

### FILTRACIÓN

#### RESUMEN

La filtración como operación Unitaria aplicada industrialmente se clasifica dependiendo de lo requerido separar. Existen la filtración por clarificación, la filtración por torta y las microfiltraciones y ultrafiltraciones. La filtración por torta es la que este trabajo abarca, resaltándose su concepto y diferenciándola de los otros tipos. Se especifica la forma de cómo se dan estas filtraciones por torta en los equipos que son filtración a Presión Constante y Filtración a Velocidad constante formulando para cada una las ecuaciones matemáticas a utilizar en el cálculo de sus parámetros de diseño.

#### INTRODUCCIÓN

En los diferentes procesos industriales, se presenta la necesidad de separar los componentes de una mezcla en fracciones, para poder describir los sólidos divididos y predecir sus características. Dentro del amplio campo de las separaciones existen dos grandes grupos:

- (a) El grupo de las separaciones difusionales que son realizadas con cambios de fases y transporte de materia de una fase a otra
- (b) los métodos correspondientes a las separaciones mecánicas, que comprende **filtración**, sedimentación, centrifugación y tamizado.

Estas separaciones son aplicables a mezclas heterogéneas y no a homogéneas y la forma de separación depende de la naturaleza de la partícula que vaya a ser separada y de las fuerzas que actúan sobre ella para separarlas. Las características de las partículas más importantes a tener en cuenta son el tamaño, la forma y la densidad, y en el caso de fluidos, la viscosidad y la densidad, aplicables en separaciones de: sólidos de gases, gotas de líquidos de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos. El comportamiento de los diferentes componentes a las fuerzas establece el movimiento relativo entre el fluido y las partículas, y entre las partículas de diferente naturaleza. Debido a estos movimientos relativos, las partículas y el fluido se acumulan en distintas regiones y pueden separarse y recogerse, por ejemplo, en la torta y en el tanque de filtrado de un filtro prensa.

#### DEFINICIÓN

La **filtración** es la operación Unitaria en la que el componente sólido insoluble de una suspensión sólido-líquido se separa del componente líquido haciendo pasar este último a través de una membrana porosa la cual retiene a los sólidos en su superficie (filtración de torta) o en su interior (Clarificación), gracias a una diferencia de presión existente entre un lado y el otro de dicha membrana. A la suspensión de sólidos en líquidos se conoce como papilla de alimentación o simplemente suspensión, al líquido que pasa a través de la membrana se conoce como filtrado, la membrana es conocida como medio filtrante y a los sólidos separados se conocen como torta de filtración. Como fue dicho, el fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión, existiendo los filtros que trabajan con sobrepresión aguas arriba, presión atmosférica aguas arriba y los que trabajan al vacío aguas abajo.

La teoría de filtración es valiosa para interpretar análisis de laboratorios, buscar condiciones óptimas de filtración y predecir los efectos de los cambios en las condiciones operacionales. El empleo de esta teoría está limitado por el hecho de que las características de filtración se deben determinar siempre en la lechada (porción de solución o suspensión a filtrar) real de que se trate, puesto que los datos obtenidos con una lechada no son aplicables a otra.

Al comparar la filtración a nivel industrial ésta difiere de la del laboratorio en el volumen de material manejado y en la necesidad de manejarlo a bajo costo. Para obtener un gasto razonable con un filtro de tamaño moderado, se puede incrementar la caída de presión del flujo o disminuir la resistencia del mismo. Para reducir la resistencia al flujo el área de filtrado se hace tan grande como sea posible, sin aumentar el tamaño

total del equipo o aparato de filtración. La selección del equipo de filtrado depende en gran medida de la economía.

Las aplicaciones de la filtración en la industria pueden considerarse en tres categorías. La primera incluye todas las aplicaciones en las que la suspensión que contiene grandes cantidades de sólidos insolubles se separan en los sólidos y líquidos que la componen, formándose una torta en la parte anterior del medio conociéndose el proceso como filtración por torta o de torta. La segunda categoría, se denomina clarificación y en esta se quitan pequeñas cantidades de un sólido insoluble a un líquido valioso donde el propósito es generalmente producir un líquido claro. La tercera se denomina micro-filtración donde se separan partículas muy finas por lo general microorganismos de los alimentos.

## APARATOS UTILIZADOS EN FILTRACIÓN

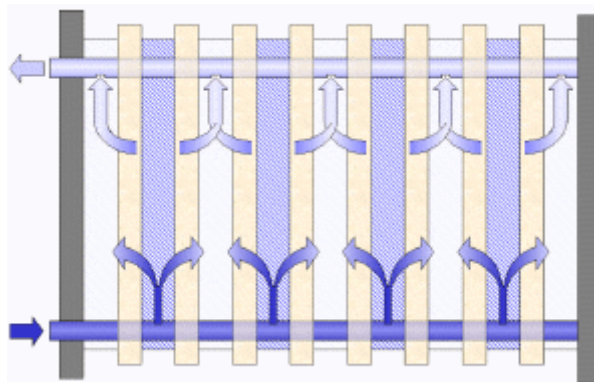
Los aparatos que se utilizan en filtración, constan básicamente de un soporte mecánico, conductos por los que entra y sale la dispersión y dispositivos para extraer la torta. La presión se puede proporcionar en la parte inicial del proceso, antes del filtro o bien se puede utilizar vacío después del filtro, o ambas a la vez, de forma que el fluido pase a través del sistema.

La mayoría de los filtros industriales operan a vacío o a presión superior a la atmosférica. También son continuos o discontinuos, dependiendo de que la descarga de los sólidos sea continua o intermitente. Durante gran parte del ciclo de operación de un filtro discontinuo el flujo de líquido a través del aparato es continuo, pero debe interrumpirse periódicamente para permitir la descarga de los sólidos acumulados. En un filtro continuo, tanto la descarga de los sólidos como del líquido es ininterrumpida cuando el aparato está en operación.

Entre los aparatos se cuentan:

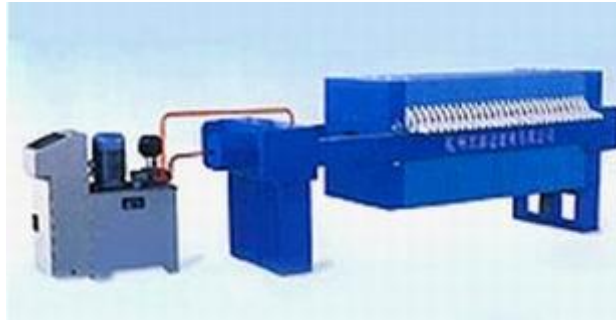
### 1.- Filtros prensa (discontinuo de presión)

En estos se coloca una tela o una malla sobre placas verticales, de manera tal que sean los bordes los que soporten a la tela y al mismo tiempo dejen debajo de la tela un área libre lo más grande posible para que pase el filtrado. Normalmente se les llama "Filtros de placa y marco". En esta clase de filtros se alternan placas acanaladas cubiertas en ambos lados por medio filtrante, con marcos, en conjunto se encuentran apretada por tornillos o una prensa hidráulica que la cierran herméticamente.



Las placas y los marcos contienen aberturas en un ángulo, las cuales forman un canal al cerrar el filtro y por donde se introduce la papilla de alimentación. Al circular la suspensión, la torta se forma en el lado más alejado de la placa, entrando por el marco, pasando el filtrado a través del medio y por la superficie acanalada de las placas del filtro y saliendo por un canal de salida en cada placa.

La filtración se desarrolla hasta que el flujo de filtrado es menor que cierto límite práctico o la presión alcance un nivel inaceptablemente elevado. Después de la filtración se puede realizar el lavado de la torta sustituyendo el flujo de la papilla por flujo de lavado, también se puede abrir el filtro y retirar la torta.



## 2.- Filtros espesadores de presión (continuos de presión)

El objeto de un filtro espesador es separar parte del líquido contenido en una suspensión diluida para obtener otra concentrada. Tiene la apariencia de un filtro de prensa, sin embargo, no contiene marco y las placas están modificadas. Las placas sucesivas llevan canales apareados que forman, cuando se monta la prensa, una conducción larga en espiral para la suspensión. Los lados de los canales están recubiertos con un medio filtrante mantenido entre las placas. Mientras la suspensión pasa por el canal a presión, una parte del fluido sigue fluyendo por el canal hacia al distribuidor múltiple de descarga de líquido claro.

La suspensión espesada se mantiene en movimiento rápido para no obstruir el canal. El número de placas escogido es tal de modo que la diferencia de presión en todo el aparato no exceda de 6 kgf /cm<sup>2</sup>. En estas condiciones es posible duplicar la concentración de la suspensión de entrada. Si se requiere una concentración mayor, la suspensión espesada en un filtro se introduce nuevamente en un segundo filtro.

## 3.- Filtros rotatorios (continuo de vacío)

En este tipo de filtros, el flujo pasa a través de una tela cilíndrica rotatoria, de la que se puede retirar la torta de forma continua. La fuerza más común aplicada es la de vacío. En estos sistemas, la tela se soporta sobre la periferia de un tambor sobre los que se está formando la torta.



## Medio filtrante

El medio filtrante puede consistir en tejido de material plástico o metálico poroso cuya función es promover la formación de una torta de sólidos.

Un medio filtrante debe cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Tener facilidad para remover la fase sólida dando un filtrado claro.
2. Debe ofrecer la mínima resistencia al flujo para la rápida formación de la torta de filtración.
3. Tener resistencia a las condiciones del proceso, es decir, ser lo suficientemente fuerte para soportar la torta y aguantar bajo condiciones extremas del proceso.
4. No debe obstruirse o sesgarse, es decir, tener alto rendimiento del líquido para un  $\Delta P$  dado.
5. Debe ser químicamente inerte y no tóxico.
6. Debe permitir facilidad del retiro de la torta limpia y completa.
7. No ser excesivamente caro.

### Filtración de torta. Generalidades

Este tipo de filtración, es la que trata grandes cantidades de sólidos en la suspensión y forma sobre el medio filtrante una pasta o "torta" de sólidos que posteriormente es retirada.

La filtración de torta presenta dos grandes tipos o forma de llevarse a cabo:

- **Filtración a  $\Delta P$  constante (Presión constante):** donde la velocidad de filtración va desde un máximo hasta un mínimo. Dentro de este tipo de filtración existe un caso particular que es el de la filtración rotatoria.
- **Filtración a  $U$  constante (Velocidad Constante):** donde la diferencia de presión va desde un mínimo hasta un máximo.

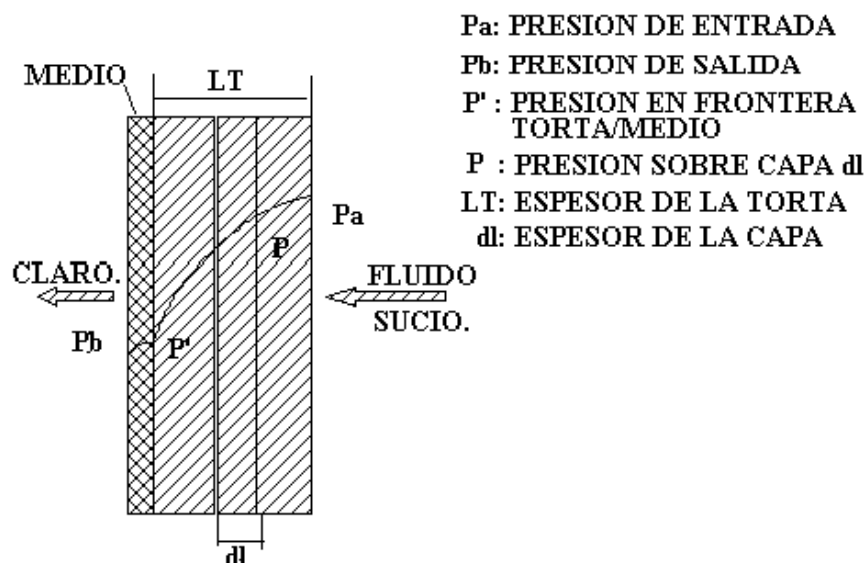
Existe otra manera de trabajo para estos filtros que es la MIXTA; no es más que aquella filtración que transcurre primero a velocidad constante, donde su  $\Delta P$  va desde un mínimo a un máximo y luego el régimen es cambiado a  $\Delta P$  constante y su velocidad va desde un máximo a un mínimo.

En el proceso de filtración por torta se pasa a través de tres clases de resistencia en serie:

- (1) Las resistencias de los canales que llevan la suspensión hasta la cara anterior de la torta, y el filtrado desde que sale del medio filtrante.
- (2) La resistencia correspondiente a la torta.
- (3) La resistencia correspondiente al medio filtrante.

Con respecto a la distribución de la caída global de presión, se observa que por ser éste un flujo en serie, la diferencia de presión total en el filtro puede igualarse a la suma de las diferencias de presión individuales. En un filtro bien diseñado las resistencias de las conexiones de entrada y salida son pequeñas y pueden despreciarse en comparación con la resistencia de la torta y del medio filtrante. Al incrustarse las primeras partículas en las mallas del medio filtrante, se produce una resistencia adicional que afecta al flujo posterior.

FIG 5.- DISTRIBUCION DE LA CAIDA DE PRESION EN LA SECCION DE UN FILTRO.





La resistencia total que se establece sobre el medio, incluyendo la de las partículas incrustadas, se llama resistencia del medio filtrante y es importante durante los primeros momentos de la filtración. La resistencia que ofrecen los sólidos, y que no se debe al medio filtrante, se llama resistencia de torta. La resistencia de la torta es cero al iniciar la filtración, a causa de la deposición continua de sólidos sobre el medio, esta resistencia aumenta continuamente con el tiempo de filtración.

matemáticamente, un filtro de torta trabaja de la siguiente manera:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (1)$$

En él existen resistencias que bloquean el paso del líquido de un lado al otro, siendo las dos más importante y caso de estudio la resistencia de la torta ( $\Delta P_c$ ) y la resistencia del medio filtrante ( $\Delta P_m$ ).

La velocidad de fluido a través de la torta viene dado por:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\text{Fuerza Impulsora}}{\text{Resistencia}} \quad (2)$$

Donde:

- $dv$ : diferencial de volumen.
- $dt$ : diferencial de tiempo.

de donde la ecuación queda:

$$(3) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{(-\Delta P_c) A^2 g_c}{\alpha \cdot m_c \cdot \mu}$$

En analogía a la resistencia de la torta, se realiza la resistencia del medio filtrante. La velocidad de fluido a través del medio filtrante viene dado por la ecuación 2 y sus miembros como la resistencia del medio filtrante y la fuerza impulsora son:

### La resistencia del medio filtrante

Una vez realizados todos los cambios que se deben la velocidad en el medio filtrante es la siguiente:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(-\Delta P_m) A g_c}{\mu \cdot R_m} \quad (4)$$

Donde:

- $R$ : Resistencia
- $R_m$ : Resistencia del medio.
- $\mu$ : Viscosidad

### COMPRESIBILIDAD DE LA TORTA

En las tortas obtenidas por filtración, la resistencia específica de ésta varía con la caída de presión producida a medida que ésta se deposita; esto se explica porque la torta se va haciendo más densa a medida que la presión aumenta y dispone por ello, de menos pasadizos al obturarse los poros y reducir su diámetro dificultando el pasaje de flujo. Este fenómeno se conoce como compresibilidad de la torta.

Una torta compuesta por partículas sólidas flexibles y deformables, blandas y floculentas, tiene una resistencia al flujo que depende de la caída de presión y varía a lo largo de todo el espesor de la torta, siendo mayor cerca del medio filtrante; a estas tortas se le denominan "Compresibles".

Las tortas denominadas "incompresibles" son aquellas formadas por partículas sólidas rígidas e indeformables donde la resistencia es independiente de la presión y no varía con la profundidad de la torta.

Tortas muy compresibles serán aquellas que derivan de sustancias blandas y floculentas, en contraste con sustancias duras y granulares, como el azúcar y los cristales de sal, que se ven muy poco afectados por la presión (la velocidad es independiente de la presión).

Para expresar esta influencia de la presión sobre las partículas de la torta se tienen ecuaciones empíricas que las representan, entre estas está:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta P)^s \quad (5)$$

donde:

$\alpha$  : resistencia específica de la torta,

$\alpha_0$ : resistencia media específica de la torta,

s: factor de compresibilidad (S=0, torta incompresible; S=1, torta compresible);

$\Delta P$ : presión total del sistema.

### ECUACIÓN GENERAL DE LA FILTRACIÓN

De las ecuaciones 3 y 4 se despejan las variaciones de presión de la torta y del medio filtrante respectivamente ( $\Delta P_c$  y  $\Delta P_m$ ) y se sustituye en la ecuación 1:

$$(-\Delta P) = \frac{dv}{dt} \frac{\alpha \cdot m_c \cdot \mu}{A^2 \cdot g_c} + \frac{dv}{dt} \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot g_c} \quad (6)$$

Realizando algunos cambios y estableciendo que:

$$C = mc / V \quad (7)$$

C: Concentración de sólidos en la solución de filtrado.

V: volumen del filtrado

mc: masa de sólidos secos.

Llegamos a:

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\alpha \cdot C \cdot \mu}{(-\Delta P) \cdot g_c} \frac{V}{A^2} + \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A} \quad (8)$$

La ecuación 7 expresa la **concentración de sólidos en el filtro en base al volumen de filtrado**.

Existe otra manera de referirse a la concentración de sólidos en la filtración que es  **$C_s = mc / V_s$** , indica la **cantidad de sólidos en base al volumen de suspensión**, con el volumen de suspensión la suma del volumen de filtrado más el volumen de líquido que queda en la torta húmeda. La siguiente formula relaciona C y  $C_s$ :

$$C = \frac{C_s}{1 - \left( \frac{m_f}{m_c} - 1 \right) \frac{C_s}{\rho}} \quad (9)$$



Donde:

mf: masa de torta húmeda;

mc: masa torta seca;

$\rho$  : densidad.

Todas las ecuaciones de la filtración vienen dadas en función de C, la concentración en base al volumen de filtrado por lo que si se dispone del dato de Cs se debe ajustar con la formula arriba mostrada utilizando el valor de la humedad de la torta en base húmeda o en base seca

La ecuación 8 es la Ecuación General de la Filtración por Torta, a partir de esta se trabaja para encontrar la Ecuación que permite calcular el tiempo de filtración en filtros a Presión Constante, integrando entre un tiempo 0 y t y entre un volumen de filtrado de 0 y V. La ecuación es:

$$\int_0^t dt = \left( \frac{\alpha C \mu}{(-\Delta P) \cdot g_c A^2} \right) \int_0^V V dv + \left( \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A} \right) \int_0^V dv$$

$$t = \left( \frac{\alpha C \mu}{(-\Delta P) \cdot g_c A^2} \right) \frac{V^2}{2} + \left( \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A} \right) V \quad (10)$$

Esta ecuación se le da la forma de una ecuación de línea recta.

$$\frac{t}{V} = \left( \frac{\alpha C \mu}{2 \cdot (-\Delta P) \cdot g_c A^2} \right) V + \left( \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A} \right)$$

$$K_p = \frac{\alpha C \mu}{2 \cdot (-\Delta P) \cdot g_c A^2}; \quad B = \frac{\mu R_m}{(-\Delta P) g_c A}$$

$$\frac{t}{V} = K_p V + B \quad (11)$$

La ecuación 11 representa la ecuación de una recta ( $y=mx+b$ ), donde la pendiente es  $K_p$  y el punto de corte con el eje y es B. Al graficar  $t/V$  en el eje de las Y, y V en el eje de las X, debe dar una línea recta donde se puede encontrar tanto su pendiente como su punto de corte y con estos poder encontrar valores importantes como lo son la resistencia de la torta  $\alpha$  y la resistencia del medio  $R_m$ .

## FILTROS ROTATORIOS

Estos son filtros que trabajan a presión constante de vacío y de forma continua. En este tipo de filtros, el flujo pasa a través de una tela cilíndrica rotatoria, de la que se puede retirar la torta.

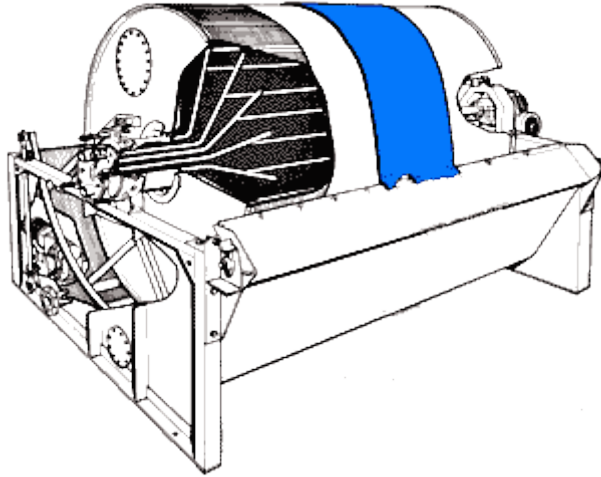
En estos sistemas, la tela se soporta sobre la periferia de un tambor sobre los que se está formando la torta.

Para este tipo de filtro la Resistencia del medio es considerada despreciable ( $R_m \approx 0$ ) y estos están conformados por 5 zonas bien especificadas:

1. Zona de filtración: parte sumergida del filtro.
2. Zona de escurrido: se le separa el exceso de aguas madres por vacío.
3. Zona de lavado: se limpia con agua (chorros), para eliminar por completo las aguas madres.
4. Zona de Secado: se seca casi en su totalidad por vacío a la torta formada.

5. Zona de raspado: se le retira a través de una cuchilla, la torta formada durante la filtración.

Luego de cumplir el ciclo el filtro rotatorio vuelve de nuevo a comenzar su filtración.



Para esta filtración se utiliza un término  $f$  que es la fracción del área total que se encuentra sumergida y del término  $t_c$  (tiempo de ciclo) que es el tiempo que dura el filtro en dar una sola vuelta.

La ecuación que rige a este tipo de filtración es:

$$\frac{2f(-\Delta P)g_c}{\alpha C \mu t_c} = \frac{V^2}{A^2 t_c^2} = U^2$$

$$\sqrt{\frac{2f(-\Delta P)g_c}{\alpha C \mu t_c}} = \frac{V}{At_c} = U \quad (12)$$

Las ventajas de los filtros rotatorios de vacío son un bajo costo de mano de obra, gran capacidad para el espacio que ocupa y flexibilidad en el espesor de la torta. Por otra parte, están limitados al uso de tortas bastante permeables y fáciles de descargar. Es difícil obtener tortas totalmente secas y el costo de adquisición del aparato es elevado. No son adecuados para el tratamiento de sustancias volátiles ni de filtrado en caliente. Su mejor uso se encuentra en la manipulación de grandes volúmenes de pulpas de características normales.

### FILTRACIÓN A VELOCIDAD CONSTANTE

Los procesos de filtración por torta se pueden llevar a cabo a velocidad constante, es decir, el valor de  $dv/dt$  es  $v/t$ . Se debe tener especial cuidado en el término "velocidad constante". Cuando se trabaja con fluidos líquidos la "velocidad" se expresa en función de flujo volumétrico (volumen con respecto al tiempo). El termino velocidad realmente viene dado por:

$$U = \frac{V}{t.A} \quad (13)$$

U: velocidad,  
V: volumen,  
t: tiempo de filtración,  
A: área de filtración



Para este tipo de filtración es la presión la que varía con respecto al tiempo, por ello es que los datos experimentales vienen en función de estas variables. La ecuación para trabajar con velocidad constante surge de la ecuación de la resistencia de la torta, ya que al inicio de la filtración se considera que la presión del medio filtrante es casi despreciable con respecto a la presión de la torta. La ecuación de la resistencia de la torta es la siguiente:

$$(-\Delta P_c) = \frac{\alpha C \mu V^2}{A^2 \cdot g_c t} \quad (14)$$

esta fórmula se trabaja para llegar a la ecuación de la filtración por torta a velocidad constante que es:

$$(\Delta P - \Delta P_m)^{1-s} = \frac{\alpha_o C \mu}{g_c} U^2 t \quad (15)$$

$\Delta P$ : resistencia total de la torta;  
 $\Delta P_m$ : resistencia del medio filtrante;  
 $s$ : factor de compresibilidad de la torta;  
 $U$ : velocidad del fluido;  
 $t$ : tiempo de filtración;  
 $C$ : concentración de la solución en base al filtrado;  
 $\mu$ : viscosidad del fluido;  
 $\alpha_o$ : Resistencia media específica de la torta.

Se realiza un cambio de variable a la ecuación 15 y queda:

$$(\Delta P - \Delta P_m)^{1-s} = K_r t \quad (16)$$

con:

$$K_r = \frac{\alpha_o C \mu}{g_c} U^2$$

Esta es la ecuación (16) de la filtración a velocidad constante, si se le aplica a esta ecuación logaritmo en ambos miembros, queda:

$$\text{Log. } t = (1-s) \cdot \text{log. } (\Delta P - \Delta P_m) + \text{log. } (1/K_r) \quad (17)$$

La ecuación 17 representa a una línea recta al graficar los valores de  $t$  (en Y) contra  $(\Delta P - \Delta P_m)$  (en X), en la cual, la pendiente es el valor de  $1-s$  y el punto de corte con el eje y arroja el valor de  $K_r$ .

Para obtener los valores para esta ecuación primero se procede a graficar los valores de  $\Delta P$  (Y) contra el tiempo (X), se extrapola para conseguir el punto de corte con y. Es aquí donde el tiempo es cero y se encuentra la presión al inicio de la filtración.

Una vez encontrado el valor de  $\Delta P_m$  se calcula, para cada valor de tiempo, el respectivo valor de  $\Delta P - \Delta P_m$  y estos valores se utilizan para realizar la línea trazada, la pendiente y el punto de corte con el eje y.

El punto de corte tiene dos formas de cálculo. Si se busca por la gráfica directamente el valor que nos da es el de  $1/K_r$ . Se busca intercectando el valor en el eje x de  $1 (1 \times 100)$  con la línea trazada y leyendo en el eje y el valor de la intersección; la otra forma es buscar  $K_r$  por la ecuación  $(\Delta P - \Delta P_m)^{1-s} = K_r \cdot t$ , solo se debe tomar un punto que este sobre la línea recta y leer sus valores de  $(\Delta P - \Delta P_m)$  y  $t$ .



## **SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN**

Esta selección depende considerablemente de los factores económicos, pero esto variará dependiendo de:

- a. La viscosidad del fluido, densidad y reactividad química.
- b. Tamaño de las partículas sólidas, distribución de tamaños, forma, tendencias a la floculación y deformabilidad.
- c. Concentración de la pasta alimentada.
- d. Cantidad del material que va a ser manejada.
- e. Valores absolutos y relativos de los productos líquido y sólido.
- f. Que tan completa se requiere la separación.
- g. Gastos relativos de mano de obra, capital y fuerza motriz.