


FILTRACIÓN



Filtración

La filtración es un proceso que separa sólidos de líquidos, usando un medio poroso que retiene el sólido pero permite pasar el líquido.

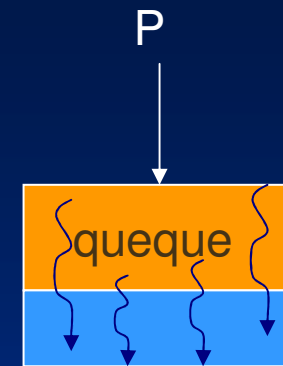
Factores que afectan la velocidad de filtración:

- Diferencia de presión desde la alimentación hasta la cara posterior del medio filtrante. 
- Área de la superficie de filtración.
- Viscosidad del líquido filtrado.
- Resistencia del queque o torta (material filtrado).
- Resistencia del medio filtrante y de las capas iniciales del queque.

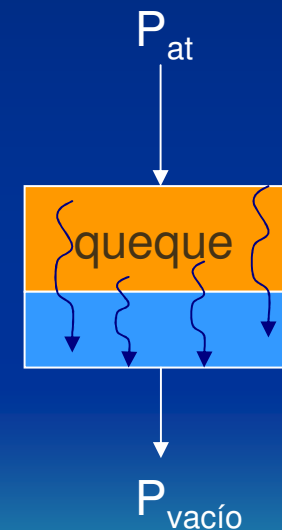
La filtración sigue generalmente al espesamiento. La pulpa espesada se alimenta a estanques de agitación desde donde se saca, normalmente, a una velocidad uniforme hacia los filtros. Algunas veces se les agregan floculantes para ayudar a la filtración.



- En los filtros de presión se consigue reducir la caída de presión, aplicando una presión positiva en el extremo de la alimentación al filtro.



- En los filtros de vacío, en cambio, se consigue reducir la caída de presión aplicando vacío en la cara posterior del medio filtrante.



❖ Factores que afectan la filtración

- Propiedades del fluido: densidad, viscosidad y corrosividad.
- Naturaleza del sólido: forma y distribución de tamaños.
- Propiedades de la pulpa: concentración y compresibilidad.
- Cantidad de material a tratar.
- Valor del material a tratar: distinguir cual es el material valioso; sólido, fluido o ambos.
- Necesidad de lavar el queque
- Importancia de la contaminación del producto.



❖ Variables de Operación

- *Variables de entrada:* Flujo y concentración de sólidos de la pulpa de alimentación al filtro.
- *Variable de salida:* flujo en la descarga del filtro y humedad del queque.
- *Variables de diseño:* Área de filtración y gradiente de presión ΔP .
- *Variables de control:* tiempos de filtración, de lavado y de secado, y magnitud de la agitación.

❖ Parámetros

Porosidad, permeabilidad y compresibilidad del queque, densidad y viscosidad del líquido filtrado, densidad y forma de las partículas.

❖ Perturbaciones

Distribución granulométrica



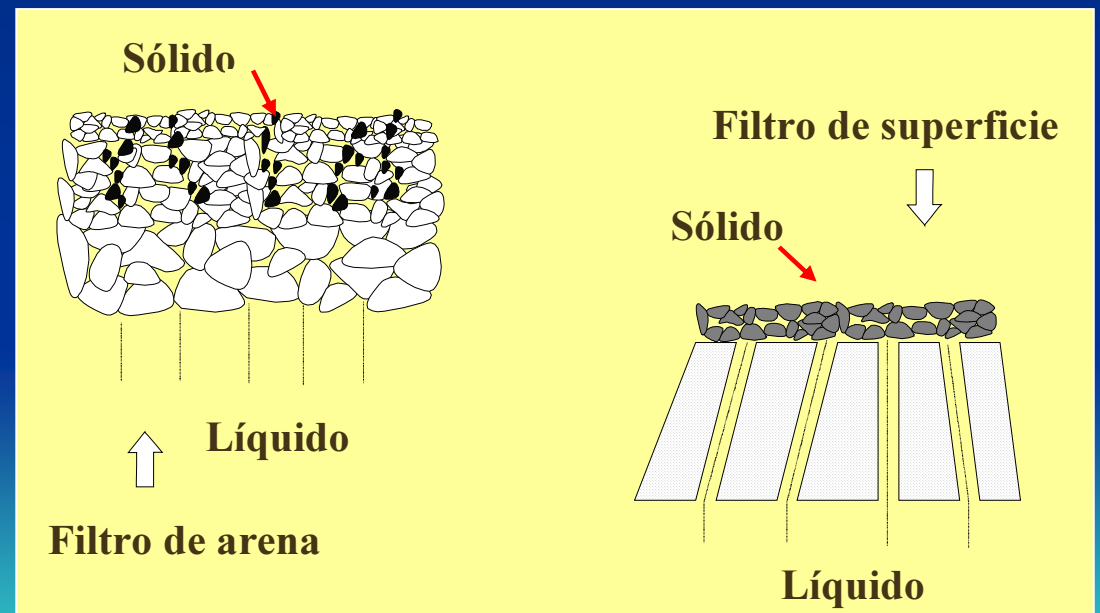
Tipos de Filtración

- *Filtros Superficiales:*

Formación de un coque superficial (ejem.: filtros de correa, discos, tambor, etc.).

- *Filtros de Profundidad:*

El coque se deposita dentro del medio (ejem.: filtros de arena).



Medio Filtrante

➤ Actúa como soporte del queque. Las capas iniciales del queque proporcionan el verdadero filtro.

➤ Se selecciona, principalmente, por su capacidad para retener los sólidos sin que se presente obstrucción. Debe cumplir con las siguientes características:

- **Mecánicamente fuertes.**
- **Resistentes a la corrosión.**
- **Permeables al flujo de filtrado.**

➤ **Materiales de fabricación:**

Algodón, lana, lino, nylon, seda, fibra de vidrio, carbón poroso, rayón, cerámicos etc.. Las telas de algodón son las más comunes, principalmente por su bajo costo y la existencia de una amplia variedad de tejidos, usándose incluso para filtrar sólidos tan finos como 10 μm .



Pruebas de Filtración

Las pruebas se realizan en un set de filtración de laboratorio



El ciclo de filtración consta de 3 etapas:

- Formación del queque (captación).
- Lavado (opcional)
- Secado.
- Descarga.

Procedimiento

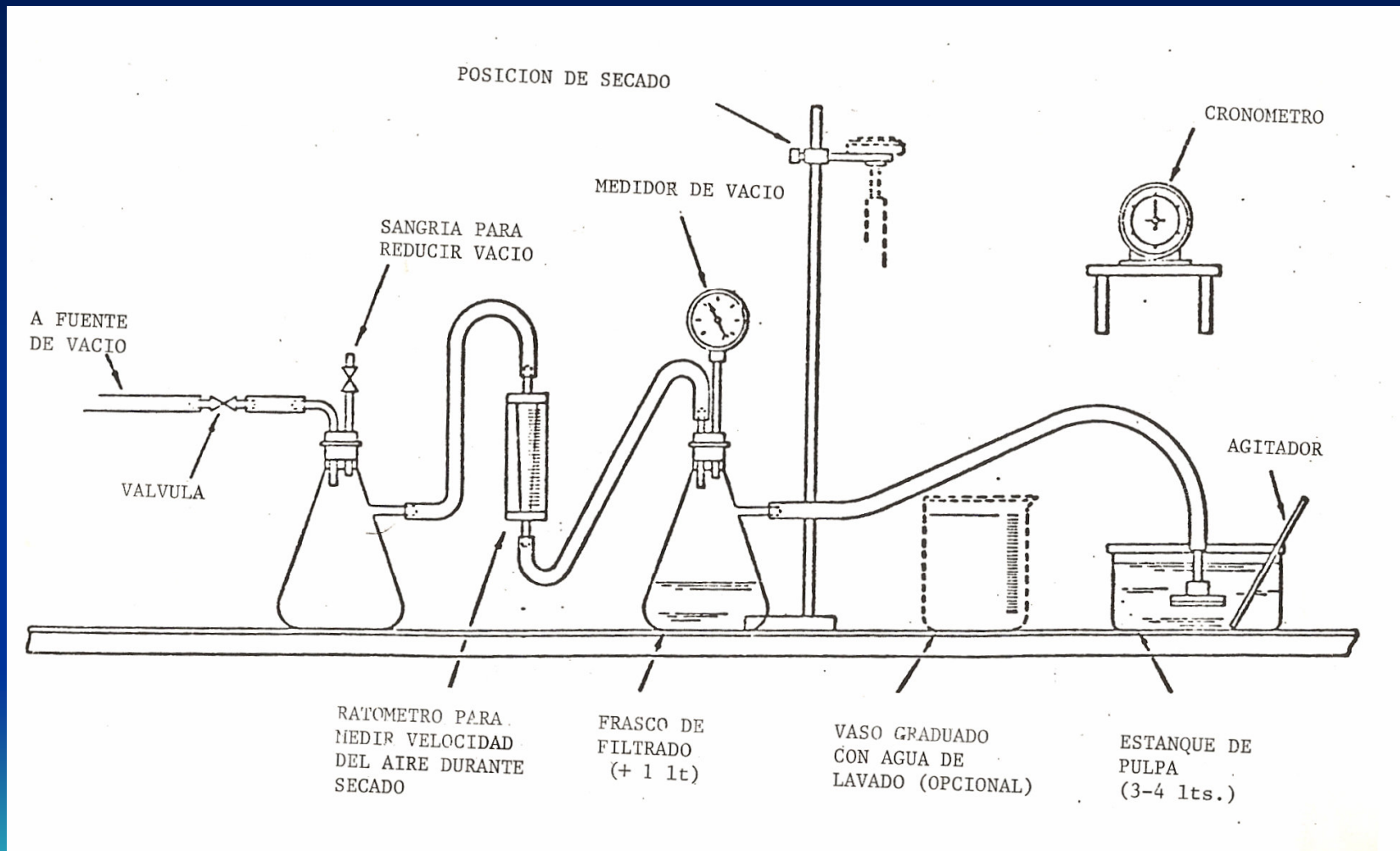
El filtro, conectado al vacío, se sumerge en la pulpa, manteniéndose allí por el tiempo de formación. Tras esto se saca el filtro y se drena a la atmósfera por el tiempo de secado. Finalmente, el queque se extrae (descarga) y pesa (en húmedo y en seco).

Nota: El tiempo de secado se determina experimentalmente.

La capacidad diaria del filtro se determina multiplicando el peso del queque seco por unidad de área del filtro de laboratorio, por el número de ciclos diarios y por el área del filtro.



INSTALACIÓN DE LABORATORIO PARA PRUEBAS DE FILTRACIÓN (TAMBOR, DISCO Y CORREA)



Tipos de Filtros

Filtros de Vacío:

- Tambor
- Discos
- Banda o Correa
- Cerámicos

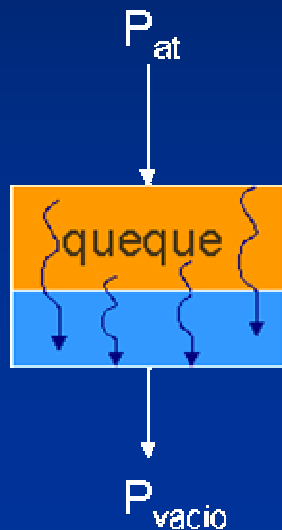
Filtros de Presión



Separación sólido - líquido

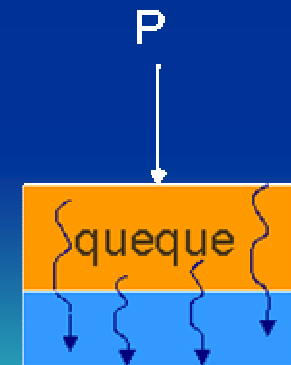
◆ Filtros

Existen diversos filtros que, en general, se agrupan en dos tipos: filtros de vacío y filtros de presión.



Filtros de vacío: se aplica vacío en la cara posterior del medio filtrante.

Filtros de presión: se aplica una presión positiva en la alimentación al filtro.



Separación sólido - líquido

Filtros de vacío:

En general su estructura considera un medio filtrante soportado sobre un sistema de drenaje, debajo del cual la presión se reduce al conectar un sistema de vacío. Los filtros pueden ser intermitentes o continuos, siendo estos últimos los de uso más común.

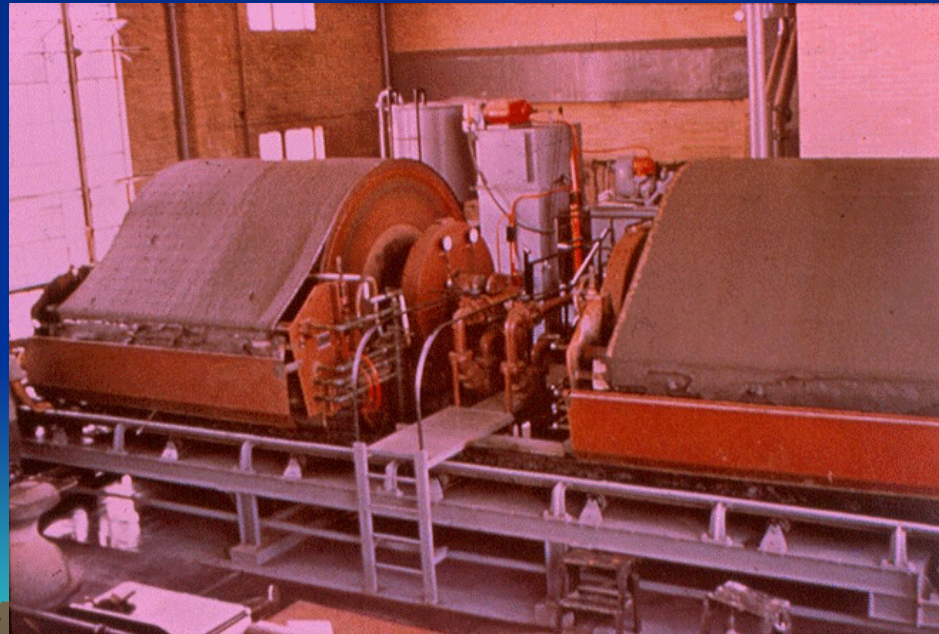
Dentro de los filtros de vacío continuos (filtros convencionales) están los filtros de tambor, de disco y los horizontales de banda o correa. Existe también el filtro cerámico, que es similar al de disco pero utiliza menor vacío, al aprovechar el principio de la capilaridad.



Separación sólido - líquido

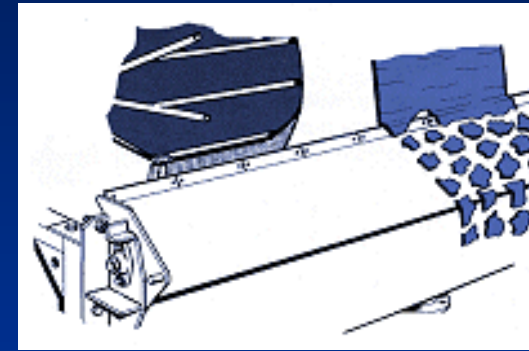
➤ Filtro de tambor

El tambor se monta horizontalmente y está parcialmente sumergido en un estanque al que se le alimenta la pulpa. El medio filtrante envuelve herméticamente la superficie del tambor, el que gira a baja velocidad (0,1 - 3 r.p.m.). Mientras el tambor gira se aplica vacío desde su interior. Las operaciones más importantes son: formación del queque y secado del queque, pero hay otras como: lavado del queque y limpieza de la tela.

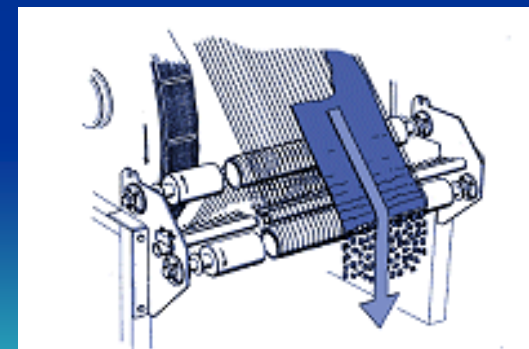


FILTRO DE TAMBOR

Descarga con raspador



Descarga con rodillos



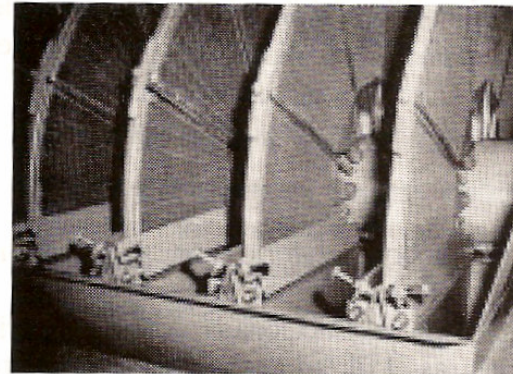
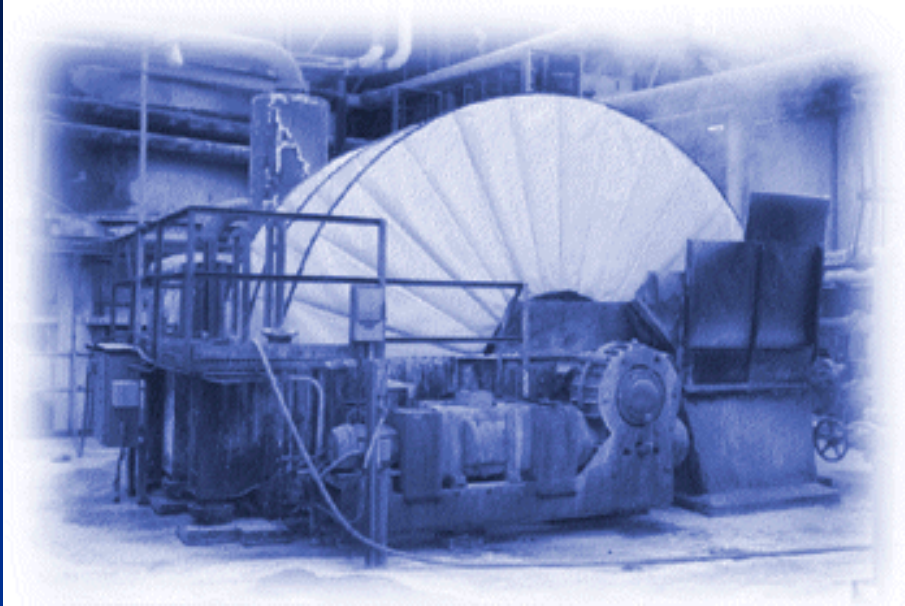
Separación sólido - líquido

➤ Filtro de discos

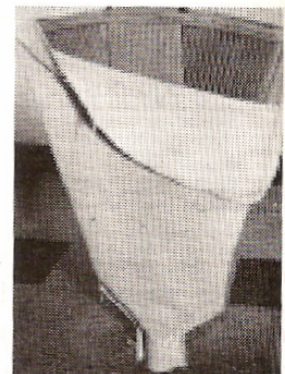
Es similar a los filtros de tambor. El queque se forma sobre ambos lados de discos, los cuales están conectados al eje horizontal de la máquina y al vacío. Los discos al girar y cuando están en contacto con la pulpa, captan el sólido (formación del queque) por efecto del vacío. Cuando están en contacto con la atmósfera se mantiene el vacío (secado del queque). Para estos filtros no existe la etapa de lavado del queque. Para la descarga del queque se utiliza soplado de aire y raspadores.



FILTRO DE DISCO



Vista del filtro

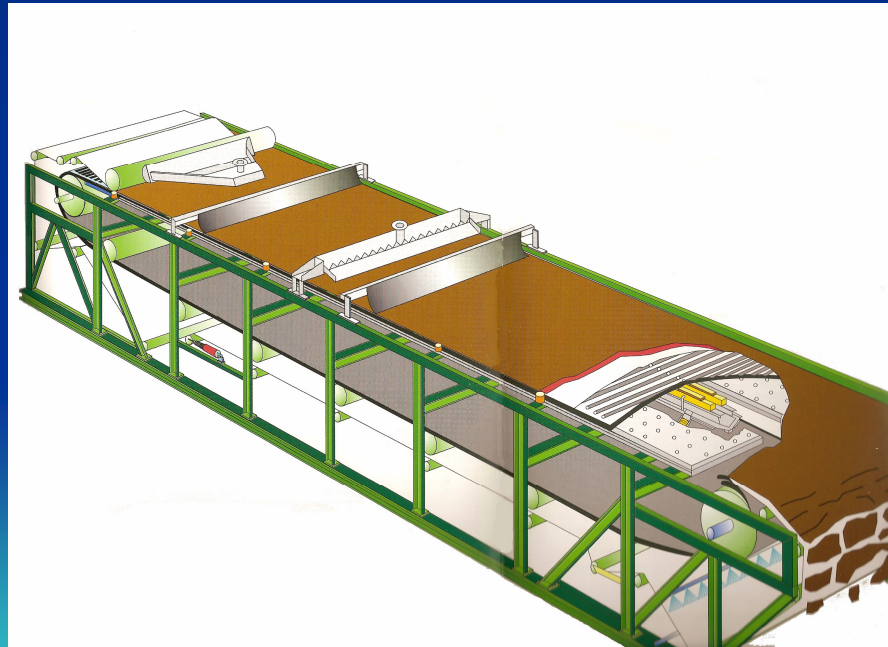


Detalle de un sector de un disco

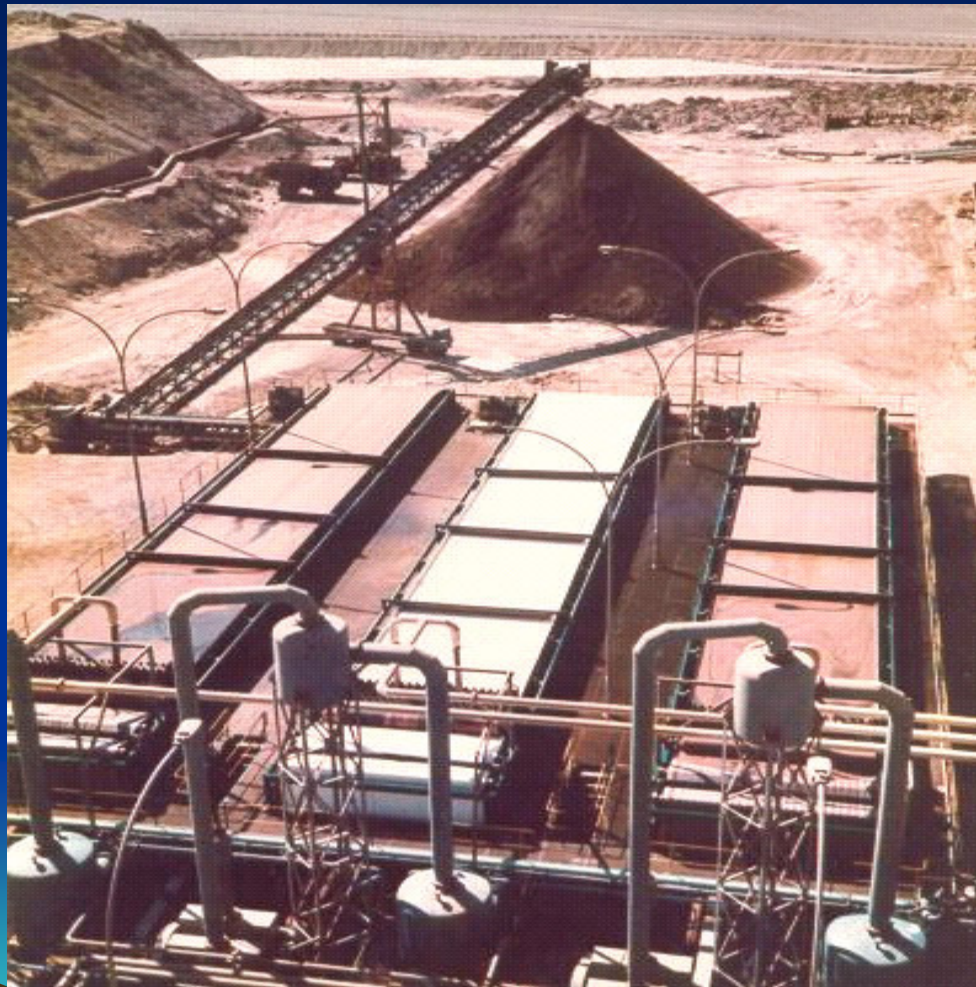
Separación sólido - líquido

➤ **Filtros Horizontales de Banda o Correa**

Consisten en una superficie sin fin de drenaje hecha de caucho perforado, conectada al vacío, que soporta una banda separada hecha de una tela filtrante apropiada. La pulpa se alimenta por gravedad sobre el filtro y la filtración comienza inmediatamente, por efecto de la presión de la capa de pulpa y el vacío. En estos filtros es posible lavar el queque. En general se utiliza para sólidos gruesos o donde se requiere una alta eficiencia de lavado. Se puede alcanzar humedades más bajas que con los filtros de disco y tambor.



FILTRO DE CORREA O BANDA



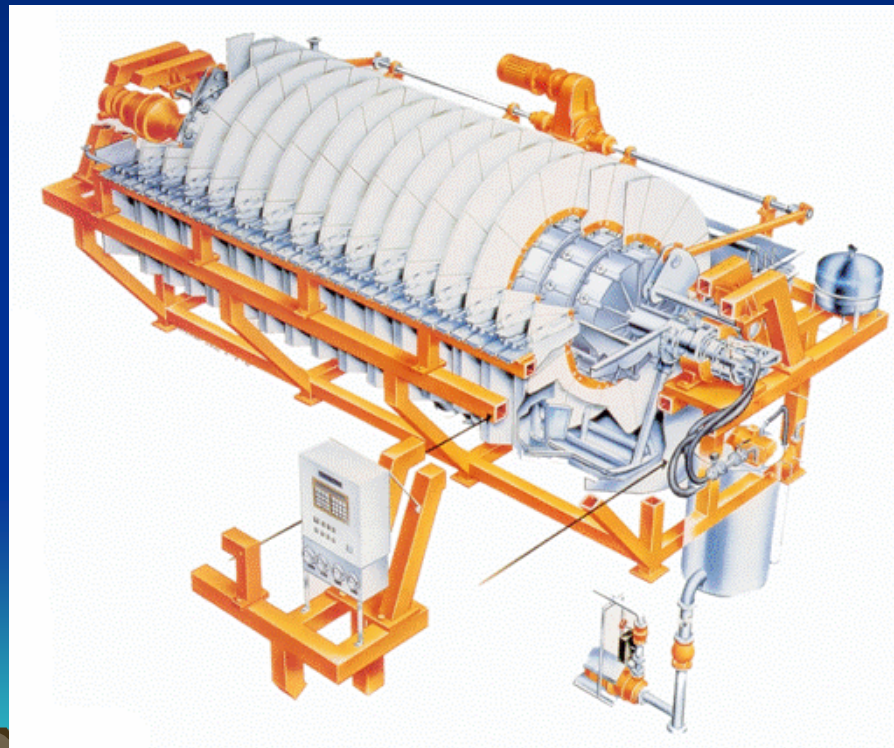
FILTRO DE CORREA



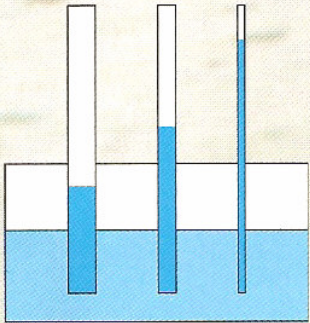
Separación sólido - líquido

➤ Filtros cerámicos

Son filtros de vacío similares a los de discos, que en lugar de tela filtrante utilizan un material cerámico de alúmina sinterizada como medio filtrante (diámetro del poro aprox $2 \mu\text{m}$). Requieren menor vacío que los filtros de discos, ya que utilizan el principio de la capilaridad.



PRINCIPIO DE CAPILARIDAD



Ley de Kelvin

Δp = presión del punto de burbujeo (bar)

θ = ángulo de mojado (grados)

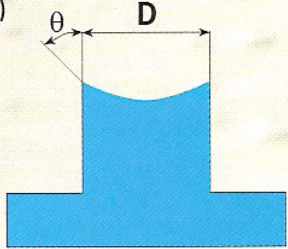
$\theta = 0^\circ$ ($\cos \theta = 1$)

D = diámetro de poro (micron)

τ = tensión superficial (N/m)
0.070 (para agua a 20°C)

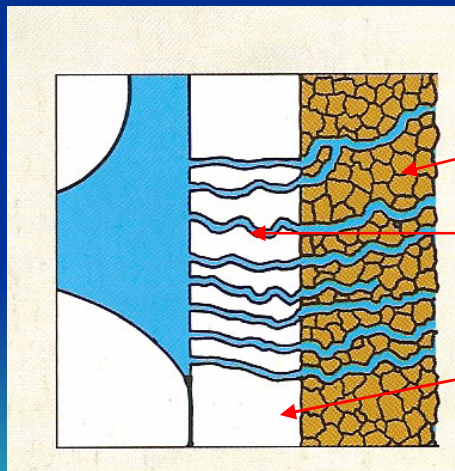
h = altura

ρ = densidad del líquido (kg/m³)



D (micrones)	Δp (bar)
8.0	0.34
4.0	0.70
2.0	1.40
1.5	1.86
1.0	2.8
0.5	5.6
0.3	9.4

$$\Delta p = \frac{4\tau \cdot \cos \theta}{D} = \rho \cdot g \cdot h \quad D = \frac{4\tau \cos \theta}{\Delta p}$$

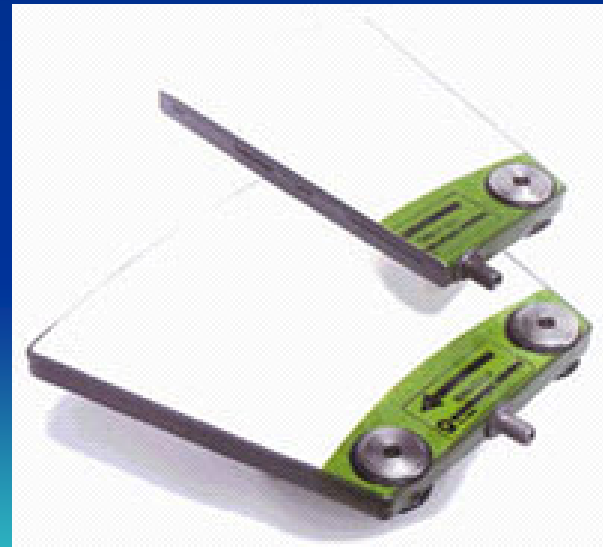
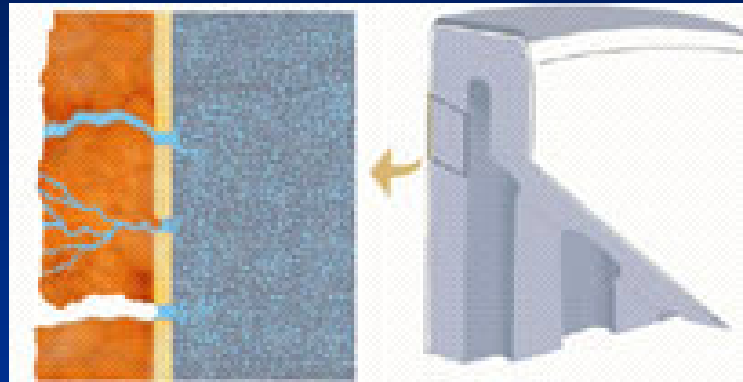


Queque

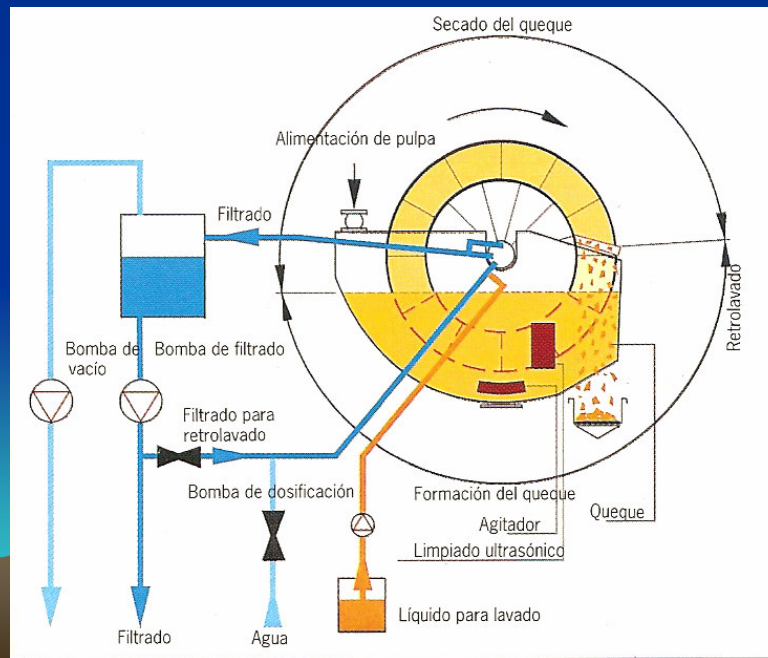
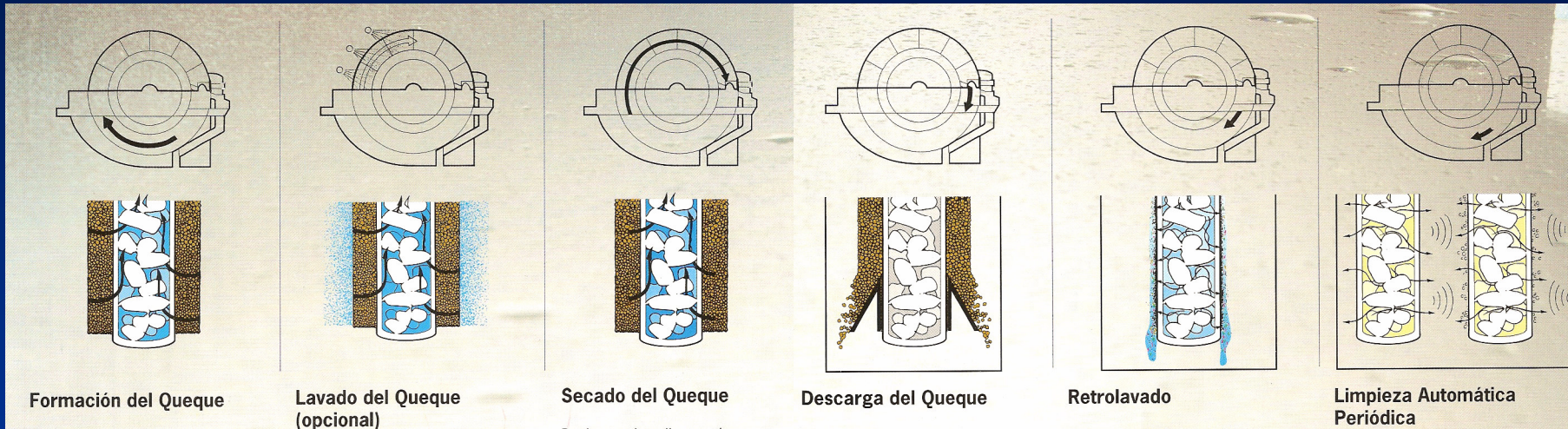
Capilaridad

Filtro Cerámico

FITRO CERÁMICO



FILTRO CERÁMICO: ETAPAS DE FITRACIÓN



Separación sólido - líquido

Filtros de presión:

La filtración a presión puede tener ventajas sobre la filtración al vacío debido a la virtual incompresibilidad de los sólidos. Se caracteriza por el uso de presiones externas, introducidas para forzar al líquido a salir de la pulpa.

La presión de trabajo puede llegar a ser tan alta como 16 bar. Los filtros de este tipo, más comunes, son los de prensa de placas verticales y los de prensa de placas horizontales. La mayoría operan de manera intermitente. Existe también el filtro hiperbárico, que es similar al filtro de disco pero inserto en una cámara presurizada.



Separación sólido - líquido

➤ Filtro de placas verticales

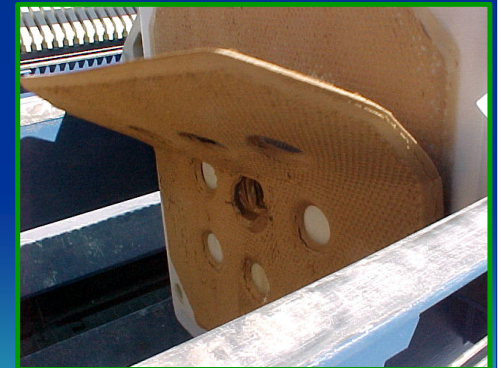
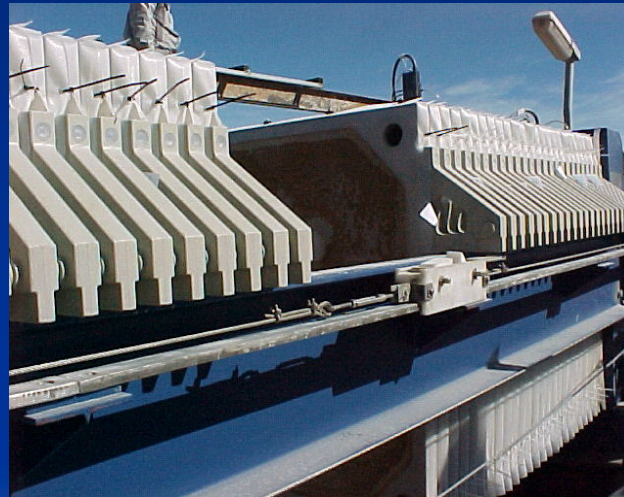
Las placas están montadas verticalmente sobre y entre dos barras laterales o suspendidas de vigas, las cuales están conectadas en un extremo a un cabezal fijo o alimentador y por el otro extremo a un cabezal de cierre. Las placas se comprimen, por medio de un sistema compuesto por un pistón hidráulico en cuyo extremo se encuentra el cabezal móvil.

La separación toma lugar en cámaras formadas entre la superficie de drenaje de placas filtrantes moldeadas que se mantienen unidas entre sí.

Las placas poseen orificios para la alimentación de la pulpa y el drenaje del líquido filtrado, y están fijas entre sí mediante una presión hidráulica.



FITRO DE PRENSA DELKOR



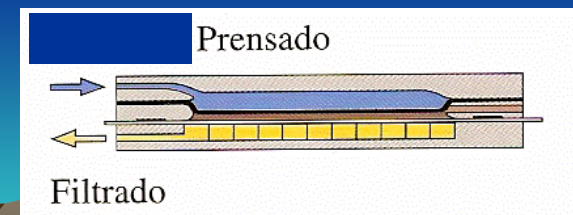
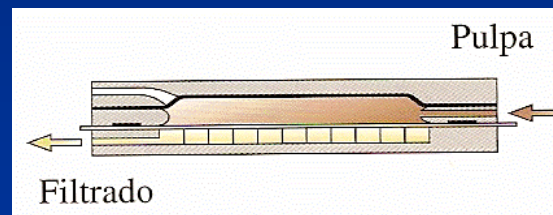
Separación sólido - líquido

➤ Filtro de placas horizontales

Tiene múltiples cámaras horizontales, por donde pasa una tela filtrante continua. Cada cámara tiene en su parte superior un diafragma y en su parte inferior un soporte de drenaje.

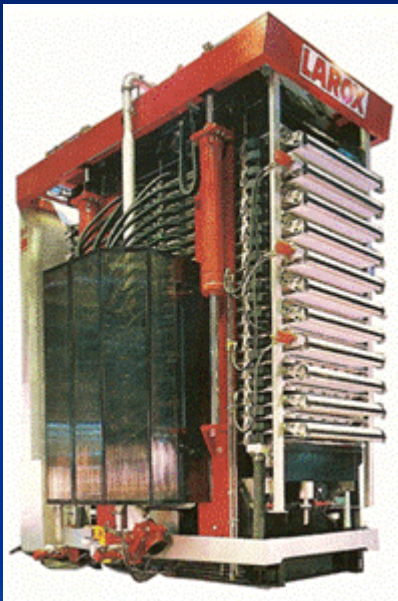
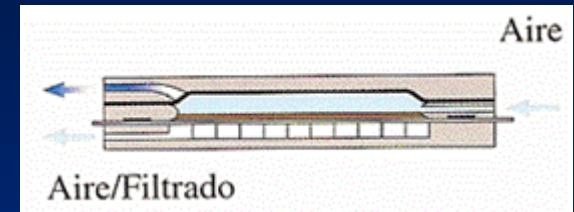
En una posición en que todas las cámaras se juntan entre sí (placas cerradas), se alimenta la pulpa a presión llenando la parte inferior de cada cámara.

Se inyecta agua a presión en la parte superior, sobre el diafragma, presionando a éste sobre la pulpa, ayudando a la filtración y formación del queque.

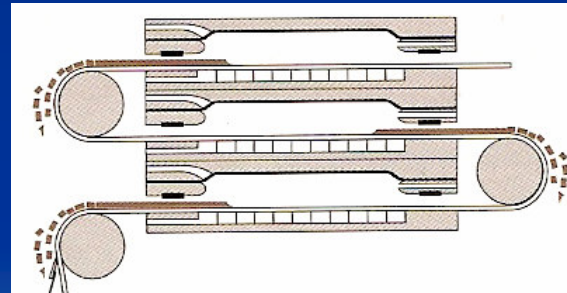


Separación sólido - líquido

En la zona inferior, en el espacio evacuado por el líquido de la pulpa ya filtrado, se inyecta aire a presión, el que presiona el diafragma hacia arriba evacuando el agua de la zona superior y secando al queque en la zona inferior.



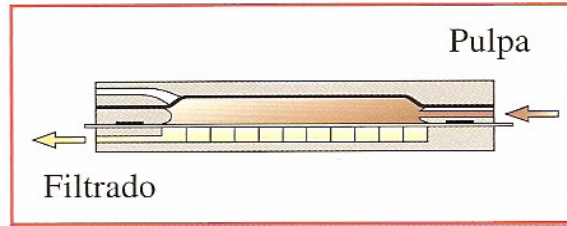
Terminada esta operación, en el filtro se expanden las cámaras, alejándose una de otra (placas abiertas), para luego iniciar el movimiento de la tela filtrante lo que provoca el desprendimiento del queque por los costados del filtro, dejando a éste listo para un nuevo ciclo.



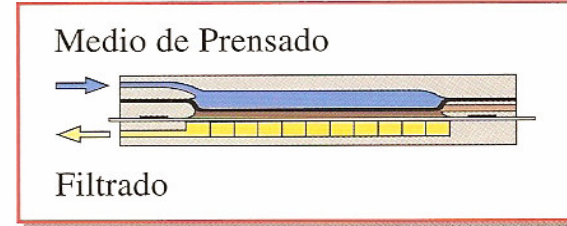
Tienen gran capacidad, generando queques más secos. Son intermitentes, automáticos y ocupan un espacio menor en planta. Son flexibles pues permiten agregar cámaras adicionales.

CICLOS EN UN FILTRO A PRESIÓN

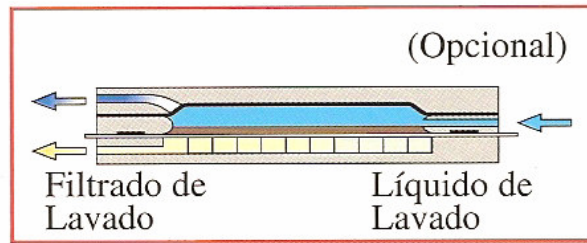
1. Filtración



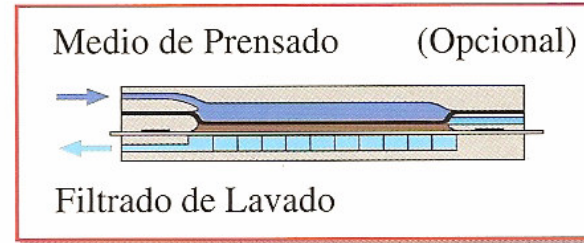
2. Prensado I del Diafragma



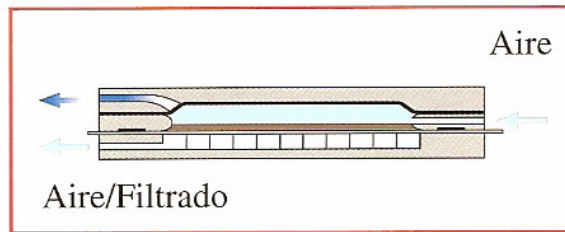
3. Lavado de la Torta



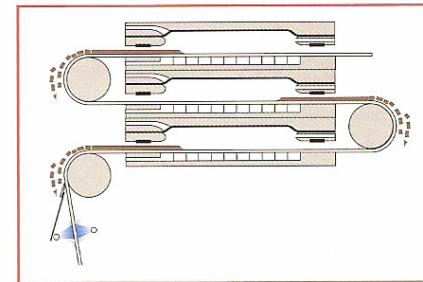
4. Prensado II del Diafragma



5. Soplado de Aire de la Torta



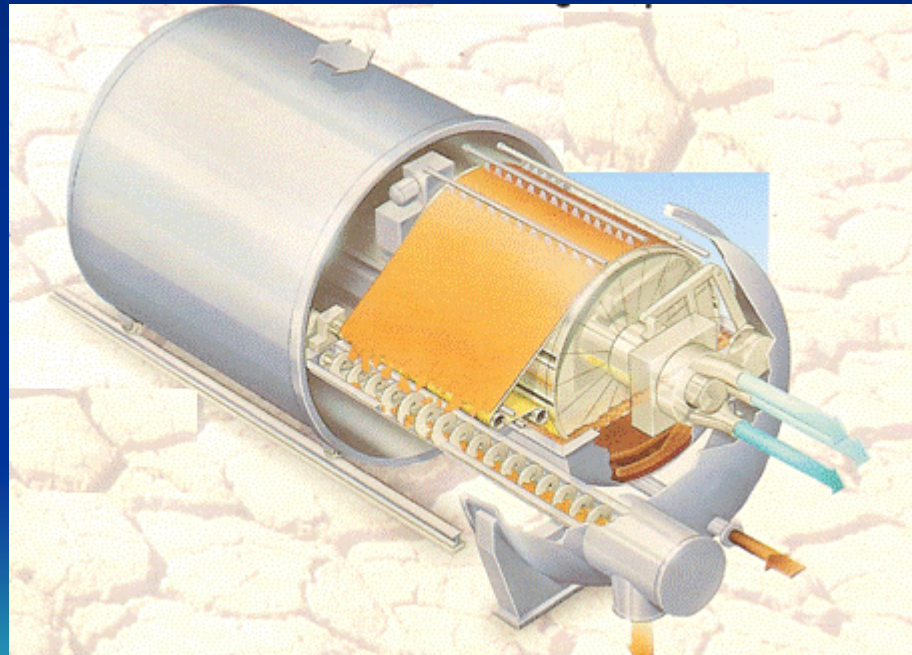
6. Descarga de la Torta y Lavado de la Tela



Separación sólido - líquido

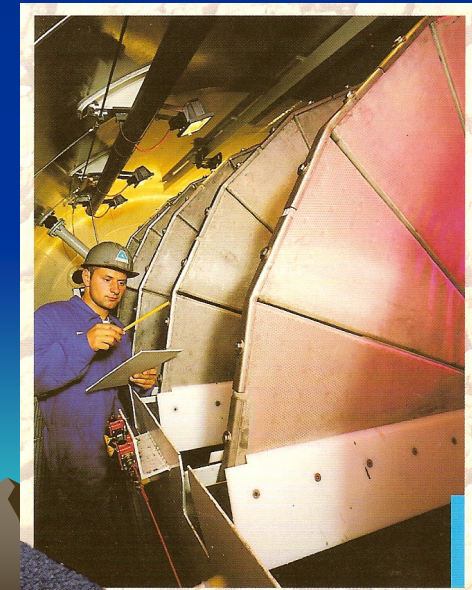
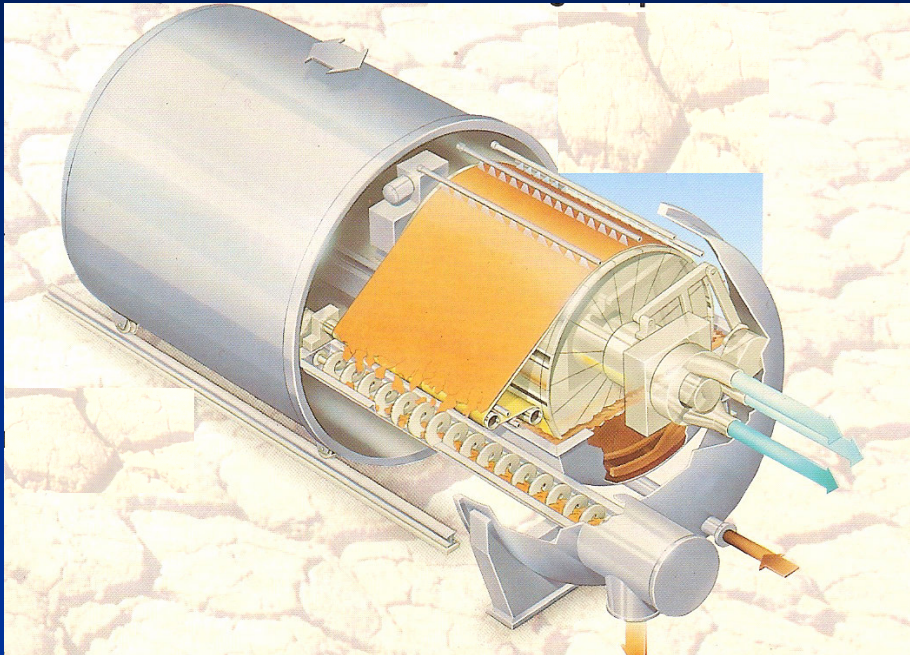
➤ Filtros hiperbáricos

El equipo consiste en un filtro a vacío: disco, tambor o de banda, inmersos en una cápsula presurizada. La descarga constituye un problema generalmente. Permite obtener humedades más bajas (8% y menores) y rendimientos más altos que los filtros de discos.



FILTRO A PRESIÓN (HIPERBÁRICO): ANDRITZ

Presión 6 bar max.

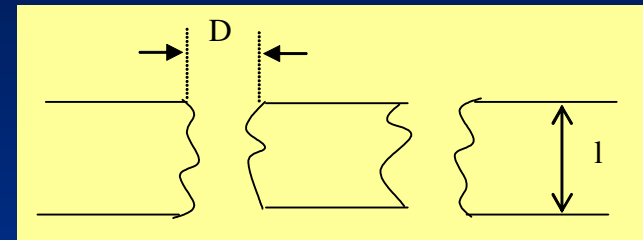


❖ Ecuaciones Generales de Filtración

◆ Filtración batch

Se entiende por superficie filtrante a la superficie aparente (A) del material filtrante sin tener en cuenta las irregularidades superficiales (poros).

Tela Filtrante con poros de diámetro “D” y espesor “l”



Ecuación de Poiseuille:

$$v = \frac{D^2}{32\mu} \left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)$$

v = velocidad media del flujo.

μ = viscosidad del fluido.

D = diámetro del poro de la tela filtrante.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)$ = pérdida de carga por unidad de largo. Diferencia entre la presión de entrada (p_1) y salida (p_2) dividido por el espesor del material filtrante “l”.

Ecuación General de Filtrado:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{A(p_1 - p_2)}{\mu(R_{s1} l_1 + R_{s2} l_2)} = \frac{A(p_1 - p_2)}{\mu(R + R_q)}$$

Q = flujo de filtrado.

V = volumen de filtrado.

R_{s1} = resistencia de la tela filtrante de espesor l_1 , es constante durante la operación de filtrado.

R_{s2} = resistencia debido a los sólidos depositados (queque) de espesor l_2 , aumenta durante la operación de filtrado.

R = resistencia de la tela filtrante por unidad de espesor ($R_{s1} l_1$).

R_q = resistencia de del queque por unidad de espesor ($R_{s2} l_2$). Es proporcional a la masa del queque depositada por unidad de área.

$$R_q = \alpha w/A$$

α = resistencia específica del queque.

W = peso del sólido seco acumulado en el tiempo t .

Reemplazando en la ecuación anterior se llega a la ecuación **General de Filtrado** en filtración batch:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu \left(\frac{\alpha W}{A} + R \right)}$$

Adaptando los términos:

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{\Delta P}{\mu \left(\frac{\alpha w V}{A} + R \right)}$$

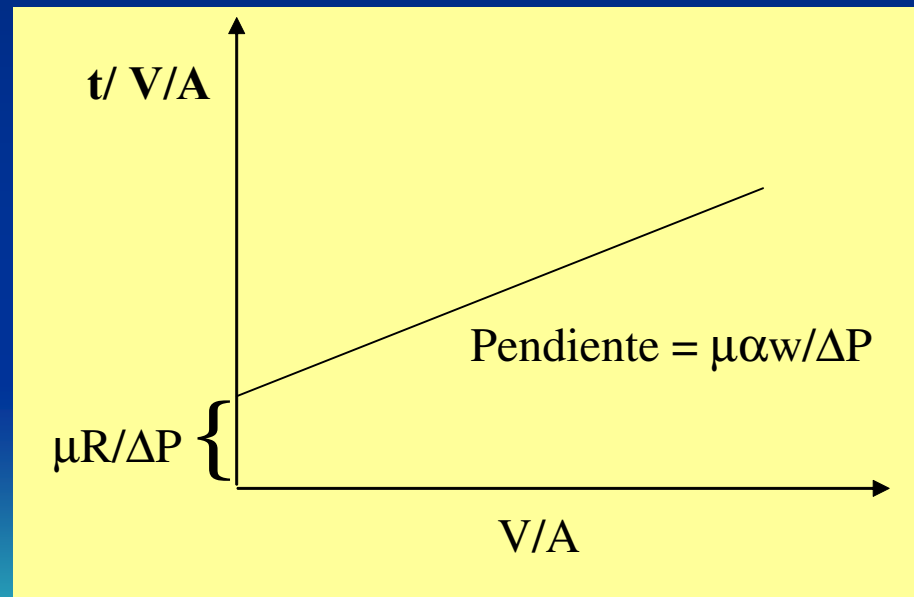
donde w corresponde al peso del sólido seco por unidad de volumen de filtrado



Integrando la ecuación anterior y dividiendo por V/A y ΔP :

$$\frac{t}{V/A} = \frac{\mu \alpha w V}{2 \Delta P A} + \frac{\mu R}{\Delta P}$$

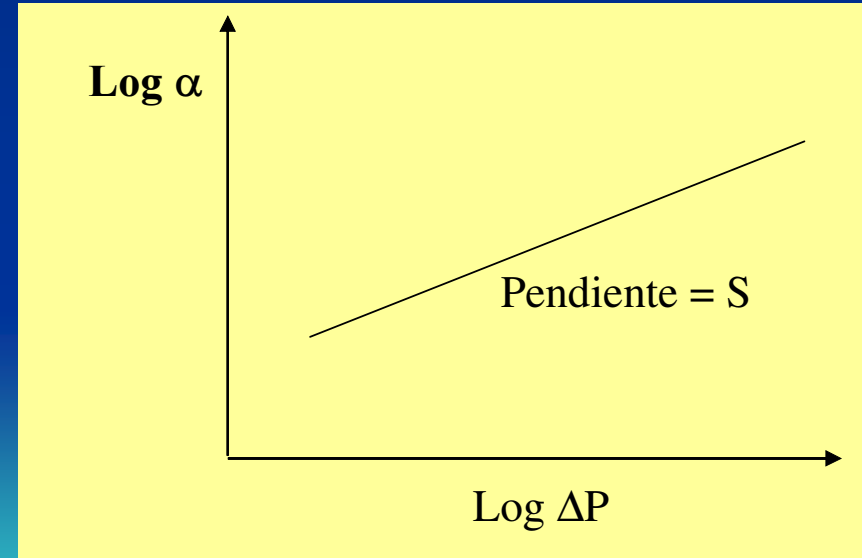
Para presión de filtración constante, se puede determinar R y α del siguiente gráfico



Normalmente se encuentra que α es función de la presión, debido a la compresibilidad del queque. Para determinar esta función se debe determinar α a 4 o más presiones diferentes y graficar. La relación entre α y ΔP está dada por:

$$\alpha = \alpha' (\Delta P)^S$$

donde α' es la resistencia específica del queque a $\Delta P = 1$ y S es el componente de compresibilidad el cual puede variar entre 0 y 1.



◆ Filtración Continua:

La filtración continua es esencialmente una filtración batch utilizando tiempos de ciclo muy cortos (20 s a 10 min) y el ciclo es repetido varias veces. En esta filtración se utiliza la ecuación de Poiseuille para la formación del queque. Los filtros continuos operan generalmente a presión constante, eliminando el factor de compresibilidad. En la filtración continua los ciclos de filtración, dependen de:

- ♣ Tasa o razón de formación del queque.
- ♣ Tasa o razón de secado o desaguado.
- ♣ Tasa o razón de lavado (sólo cuando se usa lavado):
 - tasa de penetración del fluido de lavado.
 - Eficiencia de desplazamiento del fluido de lavado.



♣ Tasa de Formación del Queque

Se puede determinar por integración de la ecuación de Poiseuille para el flujo de un fluido a través de un flujo capilar. La ecuación final de la **Tasa de Filtración** es:

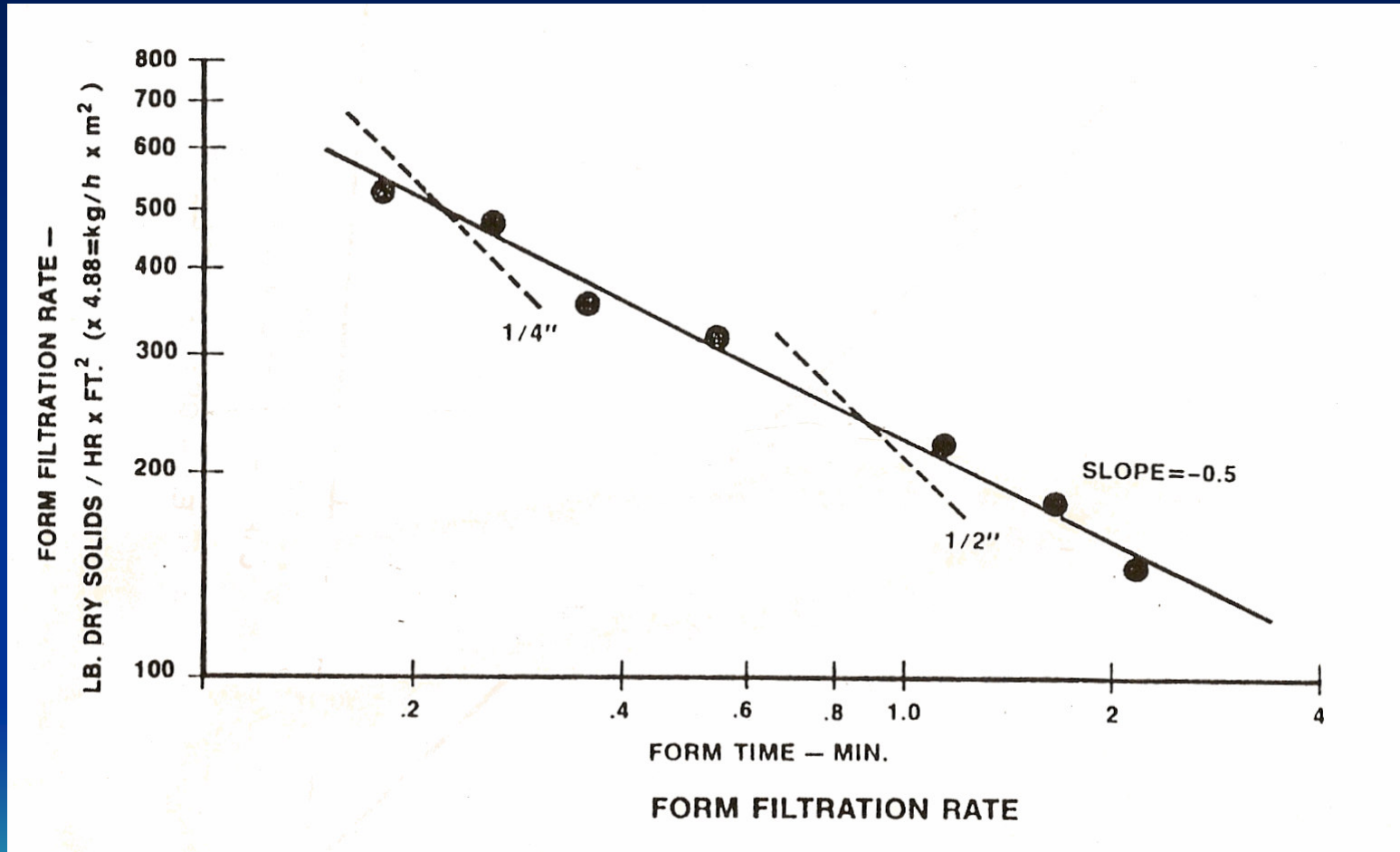
$$v = \frac{W_f}{A t_f} = \left[\frac{2 \Delta P w_f}{\mu \alpha t_f} \right]^{1/2} \quad [\text{Kg /h / m}^2]$$

W_f = peso de sólido seco (formación).

w_f = peso de sólido seco por unidad de volumen del filtrado.

t_f = tiempo de formación.

Se puede graficar Log de la tasa de filtración en la formación del queque como función de log de t_f (tiempo de formación), obteniendo una recta de pendiente $-0,5$, pero este rango puede variar entre $-0,5$ y $-1,0$.



♣ Tasa de Secado del Queque

La velocidad de secado del queque ha mostrado ser una función de varios factores, entre los que destacan:

- Tiempo de secado en el ciclo de filtrado (t_d)
- Peso del sólido seco en el ciclo de filtrado (W_d)
- Area del filtro (A).

La humedad del queque es una función de la humedad residual, del tamaño de partículas y del factor F_c , el que engloba varias variables del proceso.



$$FC = \left(\frac{CFM}{ft^2} \right) \left(\frac{\Delta P}{W} \right) \left(\frac{t_d}{\mu} \right)$$

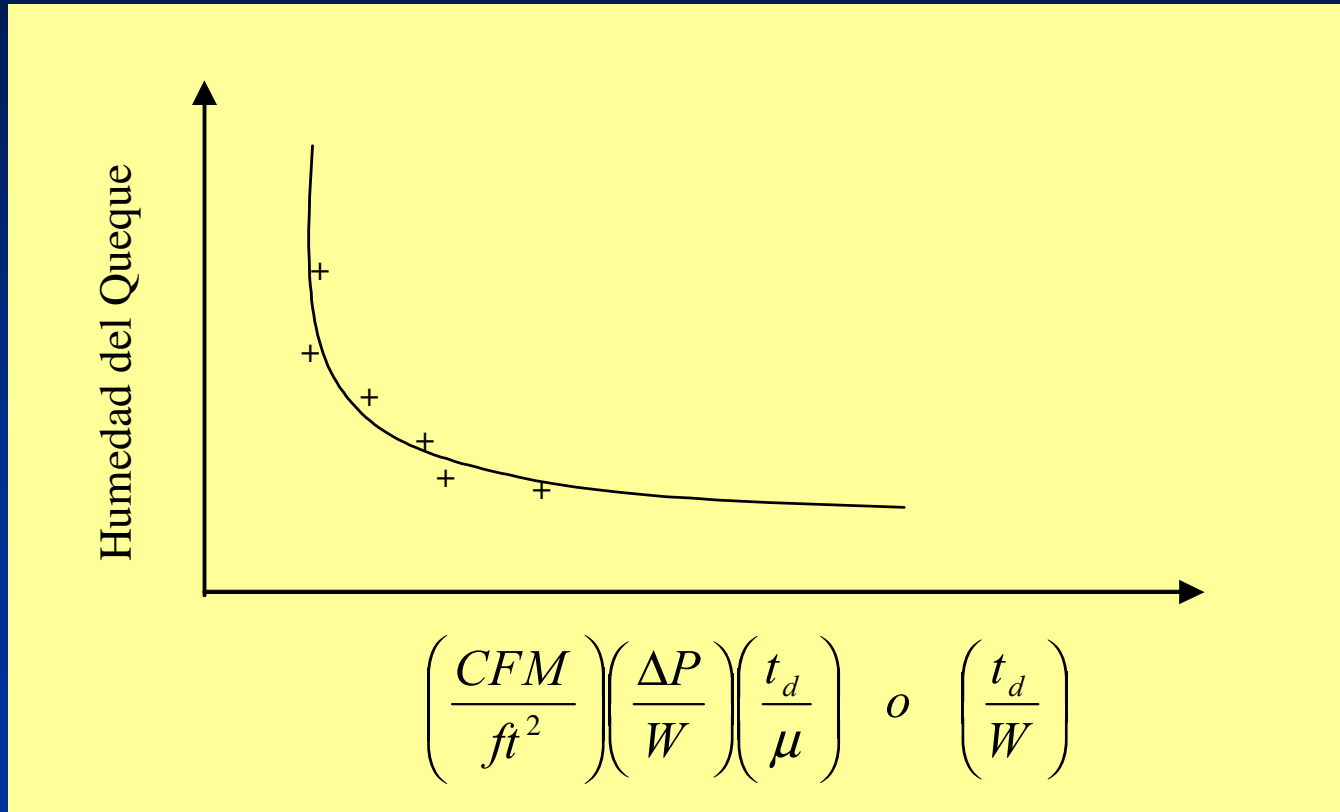
$\left(\frac{CFM}{ft^2} \right)$ = velocidad del aire a través del queque filtrado medido aguas abajo de la presión o vacío.

W = peso del queque seco por unidad de área por revolución.

μ = viscosidad del líquido.

ΔP = presión a través del queque.

Figura de Correlación de Humedad



♣ Tasa de Lavado del Queque

En el lavado existe una tasa de penetración del fluido de lavado y una eficiencia de desplazamiento del fluido de lavado.

La primera sigue la expresión:

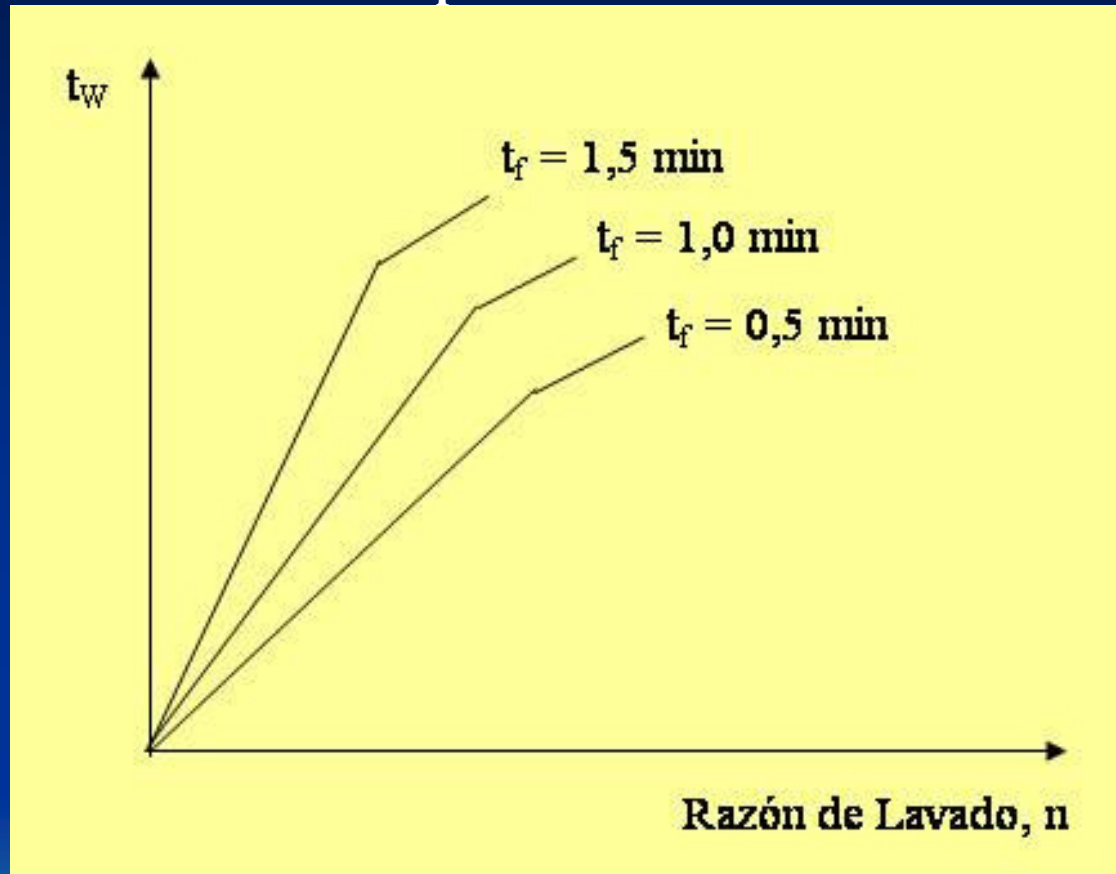
$$t_w = K t_f n$$

t_w = Tiempo de lavado del queque durante el ciclo de filtrado, normalmente medido en minutos.

K = Constante de proporcionalidad.

n = Volumen de fluido de lavado/volumen de líquido de la torta.

Tiempo de Lavado vs Razón de lavado



Como el líquido madre generalmente es más viscoso que el fluido de lavado debido a las sales disueltas, el gráfico muestra generalmente líneas rectas hasta que la razón de lavado alcanza un valor entre 0,75 y 0,9 y entonces se curva a una 2da. línea recta de menor pendiente que la inicial.

La ecuación anterior permite predecir la tasa de lavado del queque para una deseada razón y espesor del queque, ésta no indica cuan efectivo es el fluido de lavado (es decir la eliminación de los sólidos solubles). Esto se alcanza mediante el uso de la ecuación simplificada de Ruth, que expresa la eficiencia de lavado de la siguiente manera:

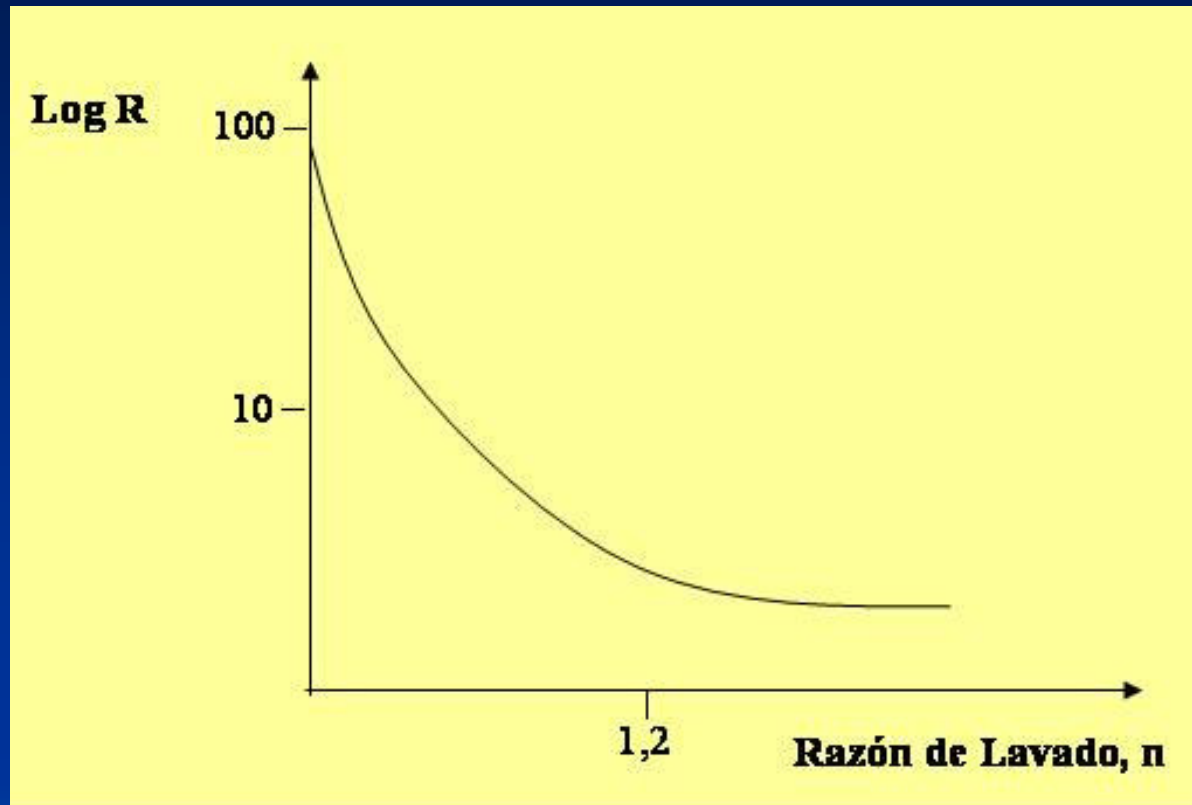
$$\frac{R}{100} = \left(1 - \frac{E}{100}\right)^n$$

n = Razón de lavado.

R = Porcentaje de sales o sólidos solubles que quedan en el queque después de lavado, suponiendo que el 100% estaba en el queque antes del lavado.

E = Eficiencia de lavado en % o $100 - R$ para $n = 1,0$.

Relación entre R y Razón de Lavado n



❖ Dimensionamiento de Filtros

Para el dimensionamiento de filtros del tipo tambor, disco y banda o correa, se requiere realizar pruebas de laboratorio como las explicadas anteriormente. En el caso de otros filtros correspondientes a nuevas tecnologías, las pruebas de laboratorio y de planta piloto las realiza el propio fabricante con prototipos del filtro, dimensionando ellos mismos el filtro requerido.

En el caso del dimensionamiento de filtros de tambor, disco y banda, es necesario determinar si el tiempo del ciclo requerido está basado en el tiempo de formación, en el tiempo de secado o, cuando corresponda, en el tiempo de lavado del queque. Estos tiempos son determinados de las pruebas de laboratorio y el tiempo del ciclo considerado será el mayor de estos tiempos.



En la filtración es necesario medir, según sea el caso, lo siguiente:

- Concentración de sólidos de la alimentación.
- Granulometría de los sólidos.
- Nivel de vacío o caída de presión.
- Contenido de humedad del queque.
- Volumen del filtrado.
- Concentración de sólidos en el filtrado.
- Contenido de solubles en el queque y en el líquido.
- Volumen del líquido de lavado.
- Tiempo de formación del queque.
- Tiempo de secado del queque.
- Tiempo de lavado del queque.
- Volumen de gas que pasa por el queque.
- Observaciones sobre facilidades de descarga del queque y tipo a utilizar.



De las pruebas de laboratorio (test de filtrado) se determina la razón de filtración como:

$$\text{Razón de Filtración} = \frac{W \ 60 \ \text{SUF}}{\text{Tiempo del ciclo}} \quad [\text{Lbs./ h /pie}^2]$$

W = peso del queque seco [lbs/pie²]

Tiempo del ciclo = tiempo de formación + tiempo de secado +
+ tiempo de lavado (cuando corresponda) [min]

SUF = factor de escala = 0,8



Fig. 2.- Espesor del Queque vs peso del queque seco

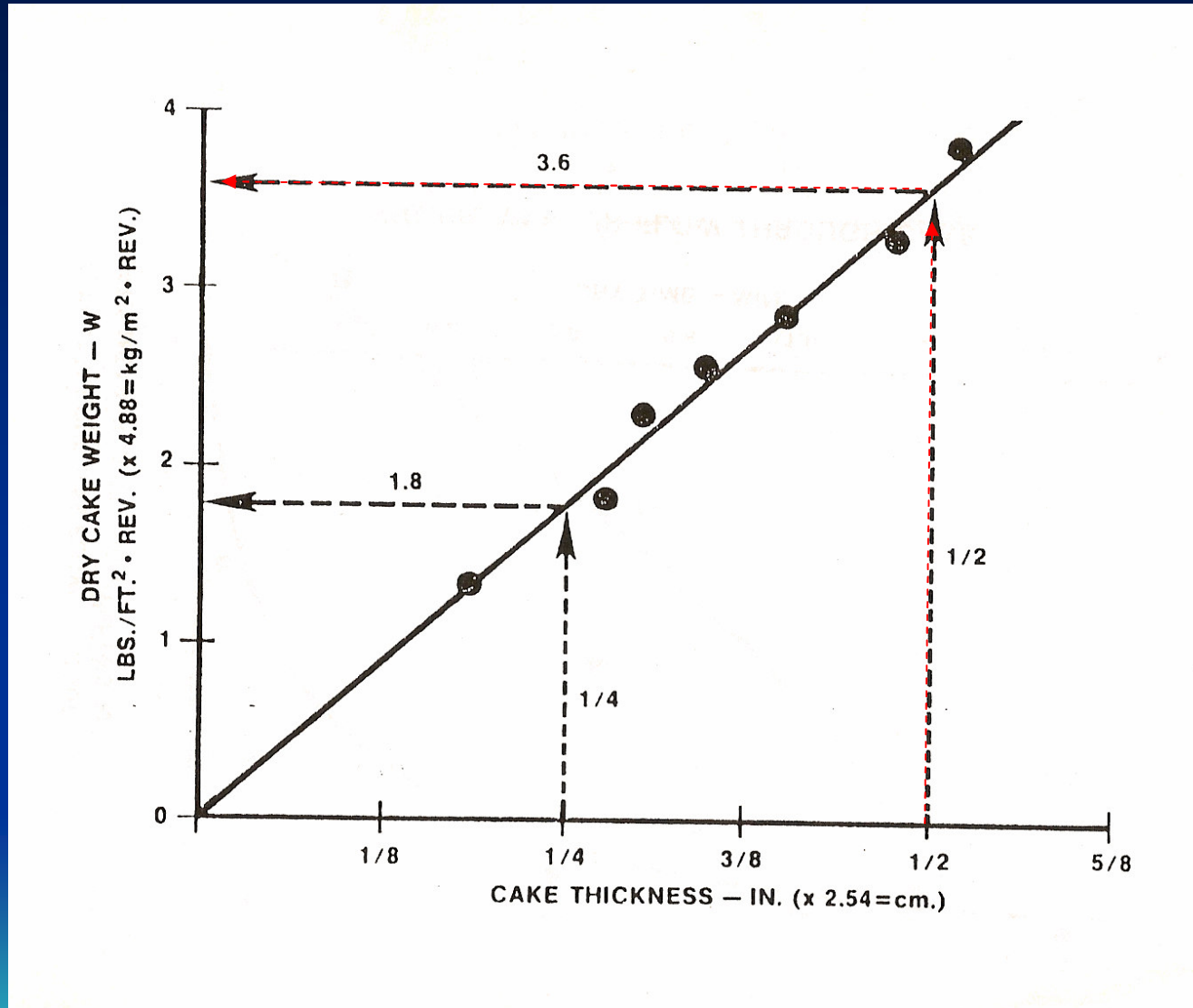


Fig 3.- Tiempo de formación vs peso del Queque seco

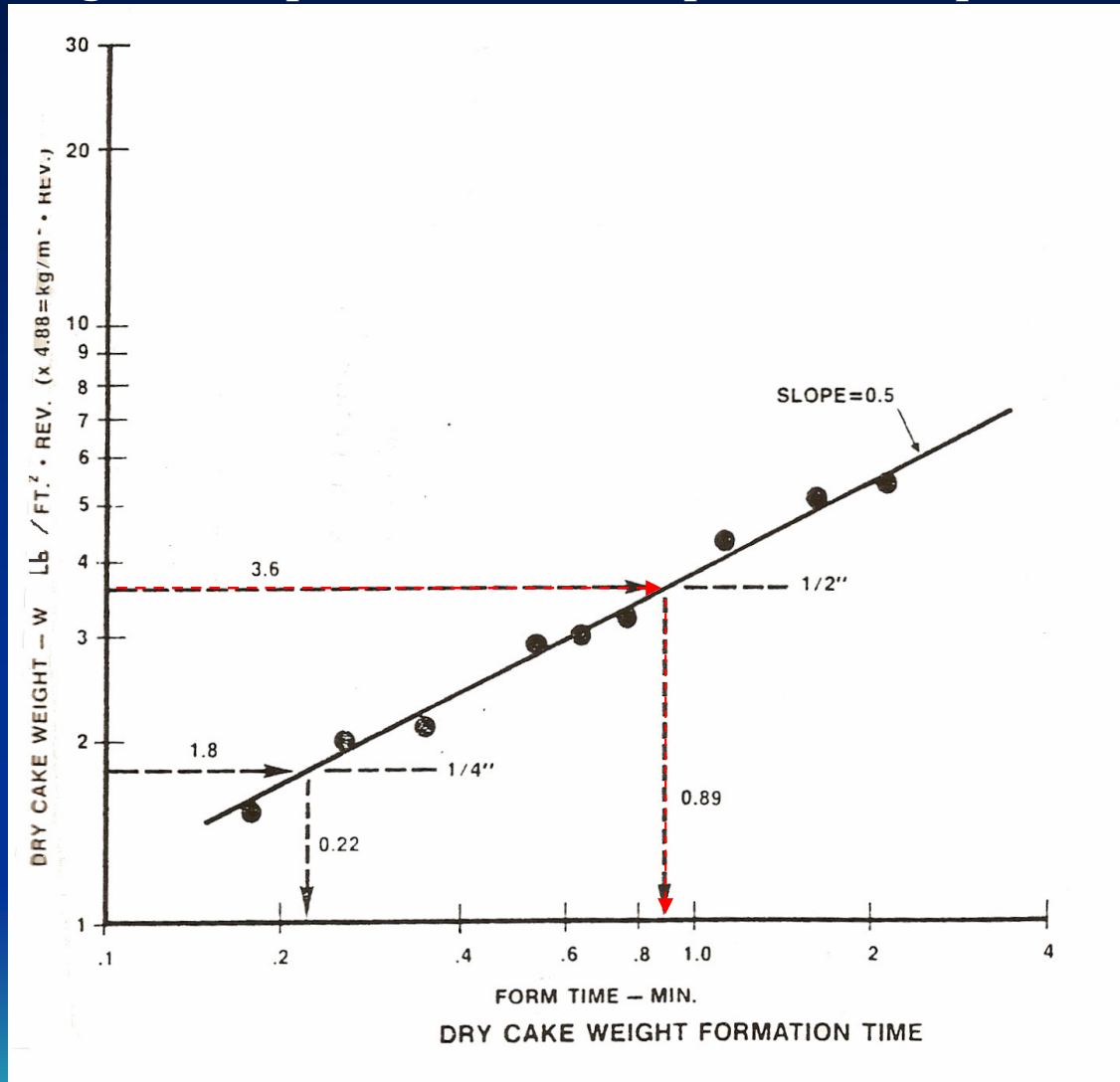


Fig. 4.- Tiempo de secado/ peso del sólido seco vs humedad del queque

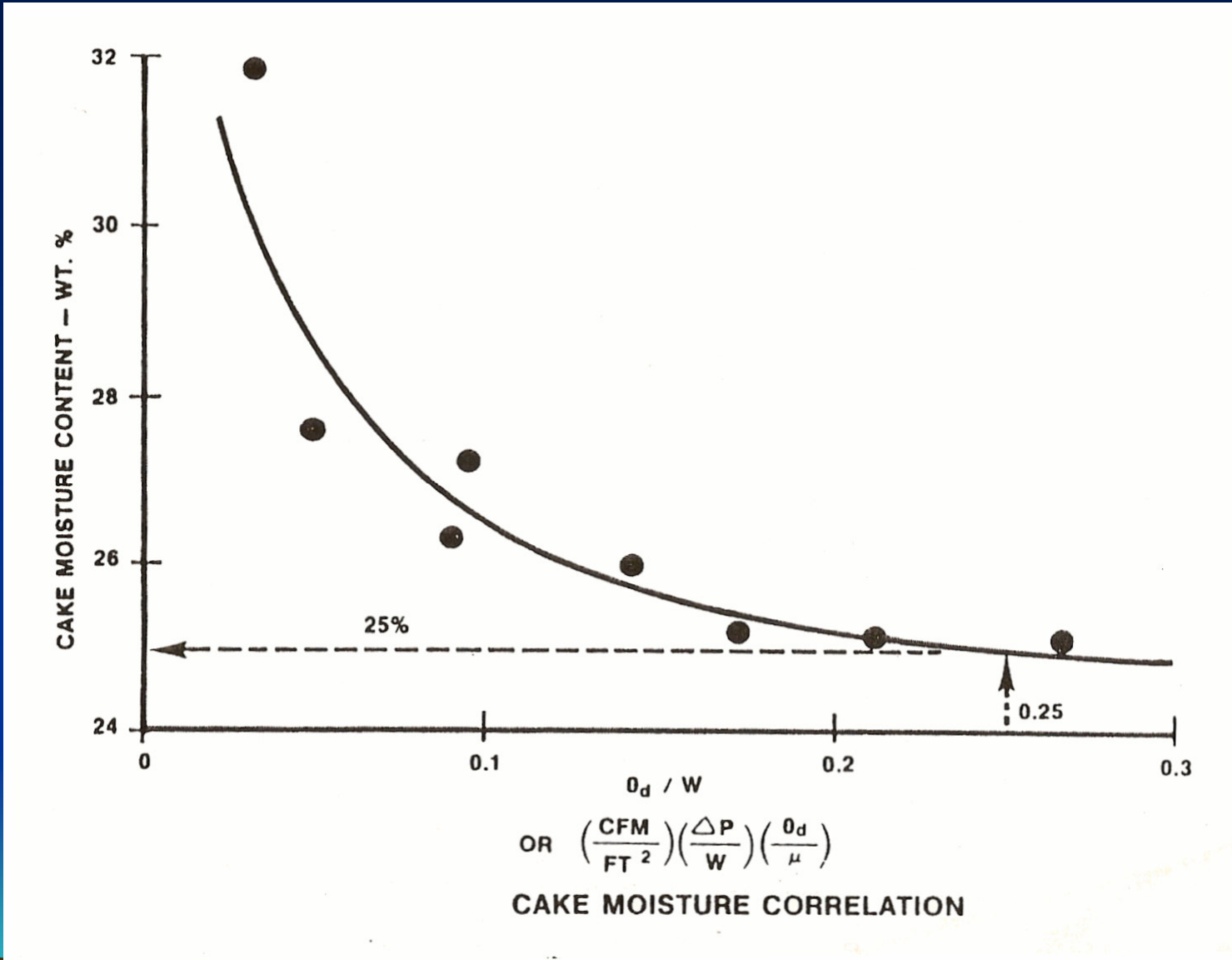


TABLE I
TYPICAL EQUIPMENT FACTORS FOR CYCLE DESIGN

Filter Type	% of Cycle					Req'd for Cake Discharge
	Submergence (2)		Total Under (1) Active Vac. or Pressure	Max (3) for Washing	Max. for Dewater- ing Only	
	Apparent	Effective (Maximum)				
Drum:						
Standard Scraper	35	30	80	29	50-60	20
Roll Discharge	35	30	80	29	50-60	20
Belt	35	30	75	29	45-50	25
Coil or String	35	30	75	29	45-50	25
Precoat	35, 55, 85	35, 55, 85	95	30	10	5
Horizontal Belt	As Req'd	As Req'd	Lengthen As Req'd	As Req'd	As Req'd	0
Horizontal Table	As Req'd	As Req'd	80	As Req'd	As Req'd	20
Tilting Pan	As Req'd	As Req'd	75	As Req'd	As Req'd	25
Disc	35	28	75	None	45-50	25

- (1) Total available for effective subm., cake washing, drying, etc.
- (2) Values for bottom feed filters assume no trunnion stuffing boxes, except for precoat. Consult manufacturers for availability of higher submergences.
- (3) Maximum washing on a drum filter starts at horizontal centerline on rising side and extends to 15° past top dead center.

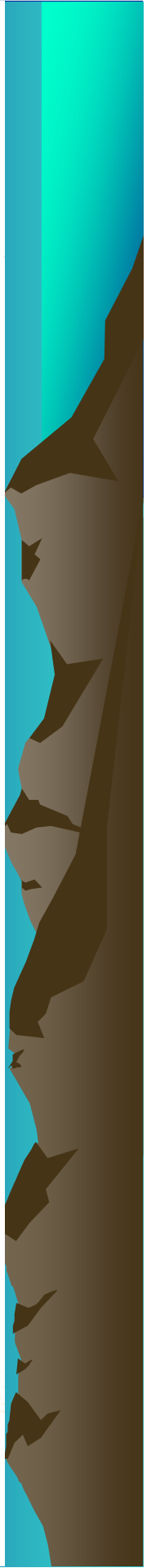


TABLE II
MINIMUM CAKE THICKNESS FOR DISCHARGE

<u>Filter Type</u>	<u>In.</u>	<u>Minimum Design Thickness</u> <u>mm</u>
Drum:		
Belt	1/8 - 3/16	3 - 5
Roll Discharge	1/32	1
Std. Scraper	1/4	6
Coil	1/8 - 3/16	3 - 5
String Discharge	1/4	6
Precoat	0 to 1/8 max	0 - 3 max.
Horizontal Belt		
Horizontal Table	1/8 - 3/16	3 - 5
Tilting Pan	3/4	20
Disc	3/4 - 1	20 - 25
	3/8 - 1/2	10 - 13

