

10  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**DESARROLLO TEORICO SOBRE LOS METODOS Y  
TECNICAS DE ANALISIS EXPERIMENTAL PARA LA  
OPERACION DE FILTRACION.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERA EN ALIMENTOS**  
**P R E S E N T A :**  
**MARIA LUISA ORDOÑEZ SILVA**

ASESOR: IBO. FERNANDO BERISTAIN.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
Desarrollo teórico sobre los métodos y técnicas de análisis experimental para la operación de filtración.

que presenta La pasante: María Luisa Ordoñez Silva  
con número de cuenta: 9057095-1 para obtener el TÍTULO de:  
Ingeniera en Alimentos.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 5 de Junio de 1996.

PRESIDENTE	<u>I.Q.I. Alvaro Leo Ramírez</u>	
VOCAL	<u>I.B.Q. Fernando Beristain</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Rosalía Meléndez Pérez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.A. Ediltrudis Estrada Lucas</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>I.A. Laura M. Cortazar Figueroa</u>	

***A Dios***

***Por todas las bendiciones que me ha dado***

***¡Gracias!***

***Dedico este trabajo  
con respeto y cariño a la memoria de mi***

***hermano Pablo.***

***En algún momento nos volveremos a encontrar.***

***A María Luisa y Pablo***

***Por ser unos padres maravillosos, que con cariño y amor  
me educaron.***

***Por el apoyo que siempre me han brindado.***

***A mis hermanas Juanita y Susy***

***Por todos los momentos que hemos compartido y contribuir a que  
seamos una familia unida.***

*A Dany*

***Por su cariño y apoyo en los buenos y en los malos momentos;  
simplemente por ser tu.***

*Al IBQ, Fernando Beristain*

*Por su oportunidad y apoyo para la realización de este trabajo.*

***A todas aquellas personas  
que incondicionalmente me han brindado su amistad.***

## CONTENIDO.

	Pág.
Introducción	1
Objetivo General.	3
<b>CAPITULO 1. Filtración.</b>	<b>4</b>
1.1. Generalidades.	5
1.2. Equipos de filtración.	12
1.2.1. Clasificación de los equipos de filtración.	12
1.2.1. Descripción de los equipos de filtración.	13
Filtros discontinuos a presión.	13
Filtro prensa de placas y marcos.	13
Área de filtración.	17
Ventajas y desventajas de un filtro prensa de placas y marcos.	17
Filtros de vacío.	18
Filtro de tambor rotatorio.	19
Válvula rotatoria.	21
Área de filtración.	22
Ventajas y desventajas de un filtro de tambor rotatorio.	24
1.2.3. Capacidad de un filtro.	25
Tiempo total del ciclo de filtración.	25
1.2.4. Aplicación de los equipos de filtración en la industria alimentaria.	27
1.3. Fundamentos de la filtración.	28
1.3.1. Distribución de la caída total de presión.	28
1.4. Ecuación general de filtración.	31
1.4.1. Velocidad de filtración.	31
1.4.1. Desarrollo teórico para establecer la Ecuación General de filtración.	35
Caída de presión a través de la torta.	36
Caída de presión a través del medio filtrante.	42
Caída de presión total en el sistema.	44

1.4.3. Ecuaciones para filtración intermitente.	45
Régimen de filtración a presión constante.	45
Compresibilidad de la torta.	46
	Pág.
Régimen de filtración a velocidad de flujo constante.	48
Lavado de la torta de filtración.	50
Régimen de filtración mixto.	51
1.4.4. Ecuaciones para filtración continua.	52
<b>CAPITULO 2. Métodos de Análisis experimental.</b>	
2.1. Aplicación práctica de la teoría de filtración.	56
2.1.1. Factores que afectan la filtración.	56
2.2. Obtención de datos a pequeña escala.	60
2.2.1. Pruebas en el embudo buchner.	61
2.2.2. Pruebas en celdas de filtración.	63
Pruebas en celdas a presión.	63
Pruebas en celdas a vacío.	65
Pruebas en filtros piloto.	68
2.3. Filtración intermitente aplicada a un filtro prensa de placas y marcos.	69
2.3.1. Análisis de datos para filtración a régimen de presión constante.	69
Análisis de datos cuando se utiliza ayuda-filtro en forma de precapa.	72
2.3.2. Determinación del índice de compresibilidad de la torta (s).	77
2.3.3. Análisis de datos para filtración a régimen de velocidad de flujo constante.	78
2.3.4. Metodología de escalamiento.	79
Escalamiento de datos para régimen de filtración a caída de presión constante.	80
2.4. Filtración continua aplicada a un filtro rotatorio.	84
2.4.1. Metodología de extrapolación para determinar el ciclo óptimo de del filtro de tambor rotatorio.	84
Conclusiones.	87
Nomenclatura.	90
Anexo 1. (Medios filtrantes y Ayuda-filtros).	93
Anexo 2. (Criterios de semejanza).	98
Bibliografía.	100

## **INTRODUCCIÓN.**

La Ingeniería en Alimentos debe basarse en una preparación tanto teórica como práctica para que el profesional sea capaz de diseñar un proceso para la elaboración de un producto determinado, así como diseñar y/o seleccionar el equipo adecuado para dicho proceso.

Para lograr este objetivo, es necesario introducirse al estudio de las llamadas Operaciones Unitarias de la Ingeniería; donde se ubican las operaciones de separación mecánico-físicas, que tienen aplicación en el procesamiento de diversos productos alimenticios, donde se requiere de la separación de suspensiones alimenticias con diferentes fines.

El problema general de la separación de suspensiones sólido-líquido en la industria se puede resolver de distintas maneras según sea la naturaleza de la mezcla que se quiera separar; la operación conocida como filtración es uno de los procesos de separación mecánico-físicos más importantes, donde la separación de ambos componentes de la suspensión se produce por su paso a través de una membrana porosa.

La teoría de la filtración es importante en la interpretación de los resultados obtenidos en el laboratorio para predecir los cambios de las condiciones o variables de operación sobre los parámetros del proceso. Sin embargo, el uso de esta teoría se ve limitado debido a que las características de la suspensión influyen de manera considerable sobre la efectividad del proceso.

Los equipos e instrumentos con que cuentan las plantas y laboratorios, en general, permiten llevar a cabo exámenes en la separación de suspensiones sólido líquido por medio de la operación de filtración y en la mayoría de las ocasiones estos equipos se limitan a las pruebas de efectividad de retención que presenta el medio filtrante y en menor medida a pruebas de filtrabilidad de las suspensiones. En este sentido, se presenta la necesidad de efectuar diferentes pruebas a nivel laboratorio con equipos simples y pequeños, que dependiendo de la motivación de la investigación

pueden estar encaminadas a estudios sobre el escalamiento o extrapolación de datos para establecer, ya sea, el ciclo óptimo de un filtro de tambor rotatorio al vacío, o el aumento de una de las variables o condiciones de operación como puede ser la velocidad de filtración, la capacidad del proceso o la magnitud de la fuerza empleada para mantener algunas condiciones de proceso.

El uso de modelos de suspensión no son aplicable a los experimentos de filtración, debido a que la magnitud absoluta de las partículas sólidas y del fluido, así como sus formas geométricas, están determinadas por las condiciones del proceso, por lo cual en una experimentación de este tipo, la suspensión a filtrar deberá poseer las mismas propiedades de filtración que a una escala mayor. Es decir, en la operación de filtración, el escalamiento de las condiciones de trabajo o el establecimiento de ciclos de operación más adecuados para una determinada suspensión, no son aplicables a otra u otras suspensiones.

A nivel laboratorio, se deben establecer las bases o condiciones para el trabajo a nivel piloto; implicando así el uso de las llamadas celdas de filtración, las cuales deben estar diseñadas guardando ciertas relaciones y condiciones que asemejen el trabajo de los filtros y así poder utilizar los resultados para un escalamiento y/o extrapolación, o la obtención de ciertas características que serán de utilidad en el trabajo del filtro piloto e industrial.

## **OBJETIVO GENERAL.**

**Desarrollar e integrar el material de consulta sobre los aspectos teóricos y experimentales de la operación de filtración aplicada a la industria de los alimentos con el fin de mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje en la asignatura de L.E.M. (Laboratorio Experimental Multidisciplinario) - III - Alimentos; para que los estudiantes utilicen los principios y teoría de dicha operación en el laboratorio y lleguen a un entendimiento práctico de los procesos estudiados, así como las limitaciones impuestas por las condiciones de aplicación o utilización de esta teoría.**

**Capítulo 1**

**FILTRACIÓN**

## 1.1. GENERALIDADES.

La separación de sólidos de una suspensión líquida mediante un medio poroso que retiene a los sólidos y permite el paso del líquido se denomina *filtración* (10).

Los mecanismos del proceso de filtración se clasifican en tres tipos, que se conocen como: *filtración superficial*, *filtración de torta* y *filtración en profundidad* (4,38), sin embargo, algunos autores, sólo mencionan o clasifican a los mecanismos de filtración en los dos últimos (10,24,46,57).

### a) *Filtración superficial.*

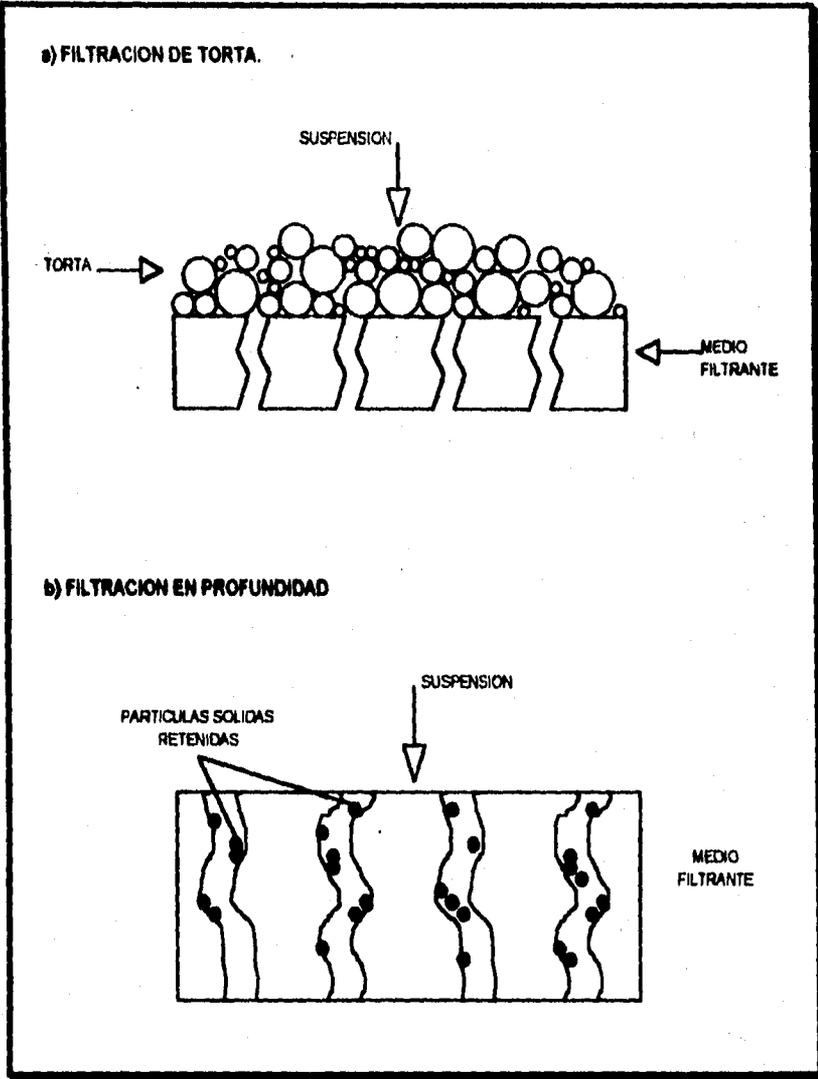
La filtración superficial es conocida esencialmente como un mecanismo de colado (4), donde las partículas de tamaño mayor al poro del medio filtrante son retenidas. En este sentido el filtro se comporta como un tamiz, y se piensa que está relacionado con el cribado de partículas grandes, sin embargo, se usa para la retención de partículas finas en membranas o tejidos metálicos (38). En este tipo de filtración la velocidad de flujo disminuye debido al taponamiento del medio filtrante y no se alcanza a formar algún espesor considerable de sólidos acumulados sobre él (4).

### b) *Filtración de torta.*

Es el tipo de filtración más común, en él se presenta una acumulación continua de sólidos en cantidad suficiente, de tal manera que se forma una torta de filtración sobre el medio filtrante.

La filtración de torta ocurre entonces, cuando un líquido que contiene partículas sólidas es forzado a pasar a través de un medio filtrante poroso, el cual está bastante abierto para permitir el paso del líquido, pero bastante ajustado para retener las partículas sólidas, que forman una torta de filtración a medida que se acumulan sobre el medio filtrante.

**Fig. 1. MECANISMOS DE FILTRACIÓN.**



**SVAROWSKY, L., 1978.**

La principal característica de la filtración de torta es que, dicha torta, debe ser lo suficientemente porosa para permitir el flujo de fluido continuo a través de ella a medida que la filtración avanza (4) (Fig. 1a).

### c) *Filtración en profundidad.*

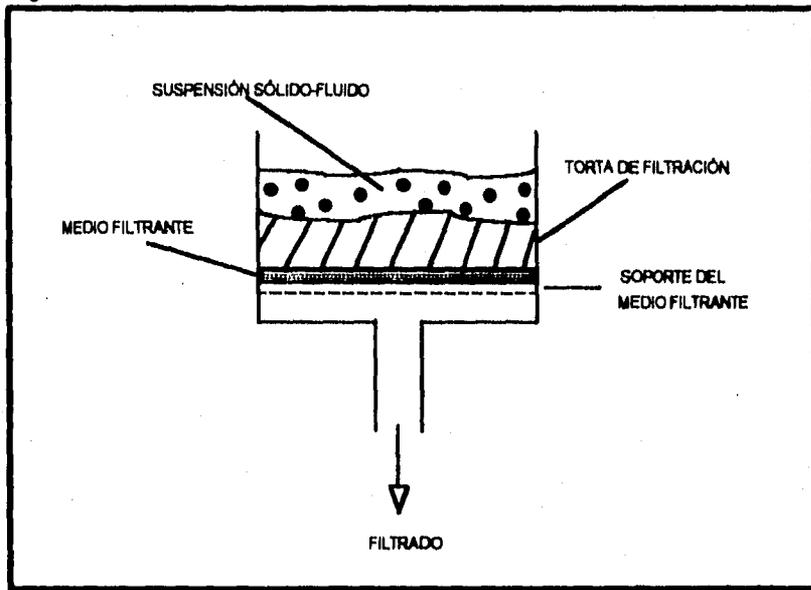
En este mecanismo de filtración, la suspensión a separar es forzada a pasar a través de una cama de material poroso. Aquí las partículas sólidas son atrapadas dentro de los espacios relativamente gruesos de los poros de la cama de material poroso (que para este caso sería el medio filtrante), permitiendo que el líquido relativamente claro pase a través de él.

En este tipo de filtración las partículas más grandes se recolectan en las primeras capas del medio filtrante y las partículas más pequeñas se depositan en las últimas capas. A medida que las partículas de sólido continúan acumulándose dentro del medio filtrante se incrementa la resistencia al paso del fluido, hasta que la velocidad de éste disminuye por abajo de los límites de velocidad aceptables y entonces, el medio filtrante debe ser regenerada o sustituida por otra; marcando así ciclos de filtración (4, 38). (Fig. 1b).

Debido a las características que presentan las suspensiones alimenticias y a la finalidad de su separación, generalmente, el proceso de filtración que se realiza es por torta; y en este sentido, se puede decir que la *filtración es un proceso de separación mecánico-físico, que se puede definir como la operación básica en la que el componente sólido insoluble de una suspensión sólido-líquido se separa del componente líquido haciendo pasar a este último a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas en su superficie.* La suspensión sólido-líquido en la operación, se conoce como *suspensión de alimentación*; al líquido que pasa a través de la membrana porosa se le llama *filtrado* y a la membrana se le conoce como *medio filtrante*. Los sólidos separados se denominan *torta de filtración* una vez que forman una capa detectable que cubre la cara superior del medio (8).

En el laboratorio, la filtración se lleva a cabo a menudo por medio de un embudo buchner. En la figura 2 se ilustra la operación; el flujo del líquido a través del medio filtrante se produce debido al vacío que existe en el extremo de salida. La suspensión consiste en el líquido y en las partículas suspendidas. Las pequeñas aberturas de los poros del medio filtrante bloquean el paso de las partículas. Se usa un soporte con orificios bastante grandes, sobre el cual se apoya el medio filtrante. Las partículas sólidas se acumulan formando la torta de filtrado, a medida que se verifica el proceso. Esta torta también actúa como filtro de las partículas suspendidas (10).

**Fig. 2. FILTRACIÓN EN EL LABORATORIO POR MEDIO DE UN EMBUDO BUCHNER.**



GEANKOPLIS, C. J., 1993.

Como se puede observar, en el ejemplo anterior para que se realice la filtración debe existir una fuerza externa que produzca el flujo del filtrado, el cual se puede conseguir por medio de la simple fuerza de gravedad, por la aplicación de una presión mayor que la atmosférica en la parte anterior del medio (filtración a presión), aplicando

fuerzas de succión por la parte posterior del medio (filtración a vacío) o por medio de fuerzas centrífugas (filtración centrífuga) (8,9,17,46).

La filtración con sólo fuerzas de gravedad esta limitada a suspensiones que contengan sólidos fáciles de escurrir o de muy bajo contenido de sólidos, se utiliza poco en la industria de los alimentos excepto en el tratamiento de aguas y aguas residuales (8). La filtración centrífuga se asocia por lo común a la sedimentación centrífuga (40).

Los tipos de suspensiones que se trabajan en la práctica comercial de la filtración, varían ampliamente, desde materiales granulares incompresibles y que filtran fácilmente, hasta materiales pegajosos y coloidales que son compresibles y que provocan un aumento en la resistencia específica al paso del fluido (3), como lo es en general, el caso de los alimentos. Entonces, se habla de la existencia de dos tipos de tortas de filtración:

- *tortas compresibles*, que están formadas por materiales que sufren una deformación por la aplicación de una fuerza externa, (6) y;

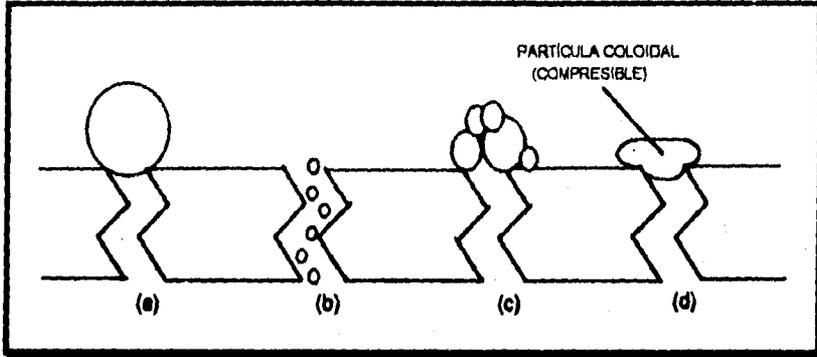
- *tortas incompresibles*, que son formadas por materiales que no son deformados tan fácilmente por los efectos de la presión o fuerza a la que sean sometidos (6).

El medio filtrante tiene la función de retener las partículas sólidas y en la figura 3 se ilustra la retención de dichas partículas:

a) Si el tamaño de la partícula es mayor que el tamaño del poro del medio filtrante, esta no podrá atravesarlo, quedando en consecuencia retenido (Fig. 3a)

b) Si el tamaño de la partícula es menor que el tamaño del poro, el proceso es por adsorción de la misma sobre las paredes interiores del medio filtrante. Es probable que este proceso este auxiliado por un fenómeno de origen electrocinético. En este caso la capacidad de retención del medio filtrante depende fundamentalmente de su superficie específica y, en consecuencia es limitada (Fig. 3b).

Fig. 3. PASO DE LAS PARTÍCULAS A TRAVÉS DEL MEDIO FILTRANTE.



c) Si las partículas de tamaño algo inferior al diámetro del poro lo obturan, aglomerándose parcialmente, permiten así, por disminución aparente de la sección de pasaje, la retención de partículas de un tamaño muy inferior. El líquido que atraviesa el medio al comienzo de la filtración pasará turbio hasta que se forme esta capa previa de partículas (Fig. 3c).

d) Si las partículas son de tipo compresibles se deforman y lo obstruyen, disminuyendo por consecuencia rápidamente la velocidad de filtración (Fig. 3d).

(23,24).

Es importante saber seleccionar el medio filtrante, pues como sabemos dependiendo del tamaño de su poro será el tamaño de partículas que pueda retener.

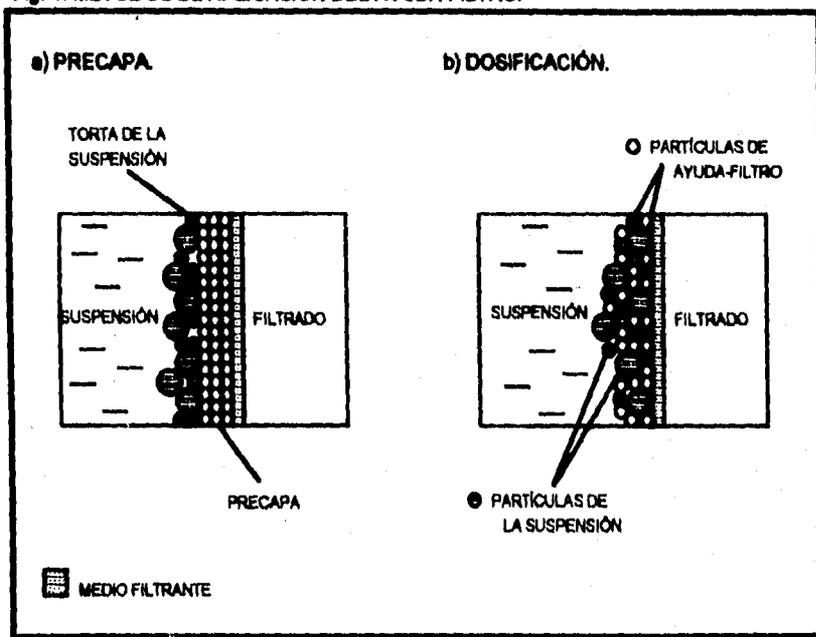
Entonces, cuando los sólidos a ser filtrados, están finamente divididos y son de características compresibles, tienden a obstruir el medio filtrante rápidamente haciendo posible solo experimentos muy cortos (8). En tales circunstancias se utilizan corrientemente los materiales conocidos como *ayuda-filtros*, cuya finalidad es la de aumentar la porosidad del medio filtrante y que este no se obstruya.

El *ayuda-filtro* forma un enrejado rígido sobre el medio filtrante y proporciona numerosos canales a través de los que puede fluir el filtrado (5).

Los ayuda-filtros pueden utilizarse en dos formas. La primera consiste en utilizarlo para formar una torta previa, conocida como *precapa*, o una capa de poco espesor del material que se deposita sobre el medio antes de que se empiece a alimentar la suspensión que se va a separar (Fig. 4a) (Ver ANEXO 1).

El segundo método de utilización del ayuda-filtro es su incorporación en un determinado porcentaje a la suspensión antes de alimentarse al filtro (Fig. 4b.), esta forma de adición se conoce con el nombre de *dosificación* (Ver ANEXO 1).

Fig. 4. MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL AYUDA-FILTRO.



## 1.2. EQUIPOS DE FILTRACIÓN.

En las operaciones unitarias, los equipos por medio de los que se realiza la filtración se denominan filtros (46). Existe una gran variedad de estos equipos y para seleccionarlos deben tomarse en cuenta factores como: viscosidad, densidad y reactividad química de la suspensión; tamaño de partícula, forma, tendencia a la floculación y a la deformidad; concentración de sólidos en la suspensión; cantidad de material a manejar; grado de separación requerida y, costo relativo de mano de obra, capital y energía(23).

### 1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN.

Existen diversos métodos para clasificar los equipos de filtración y no es posible establecer un sistema simple que incluya todos los tipos. Algunas de las agrupaciones se presentan a continuación:

1. *Por la fuerza impulsora.* El flujo del filtrado se puede inducir mediante la carga hidrostática (gravedad), aplicando presiones por arriba de la atmosférica (filtros a presión) o con presiones por abajo de la atmosférica (filtros a vacío). También se puede inducir a través de fuerzas centrífugas (Filtración centrífuga) (19,39,46).

2. *Por el mecanismo de filtración.* Se tienen filtros de torta y filtros a profundidad (46).

3. *Por la función.* La meta de la filtración puede ser la obtención de sólidos secos (la torta es el producto de valor), líquido clarificado (el filtrado es el producto valioso) o ambas cosas (46).

**4. Por el ciclo operacional.** Los filtros pueden ser intermitentes (por lotes) o continuos (31) y los filtros por lotes se pueden manejar con una fuerza impulsora de presión constante, a velocidad constante o en ciclos variables, con respecto tanto a la presión como a la velocidad (46).

Estos métodos de clasificación no se excluyen mutuamente. Así, por lo general, los filtros se pueden dividir primero, por el mecanismo de filtración con el que operan, en grupos de máquinas que utilizan la misma fuerza impulsora y, luego, en intermitentes o continuos. Por ejemplo, se puede tener un filtro de torta a presión intermitente, como es el caso del filtro prensa de placas y marcos.

## **1.2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN.**

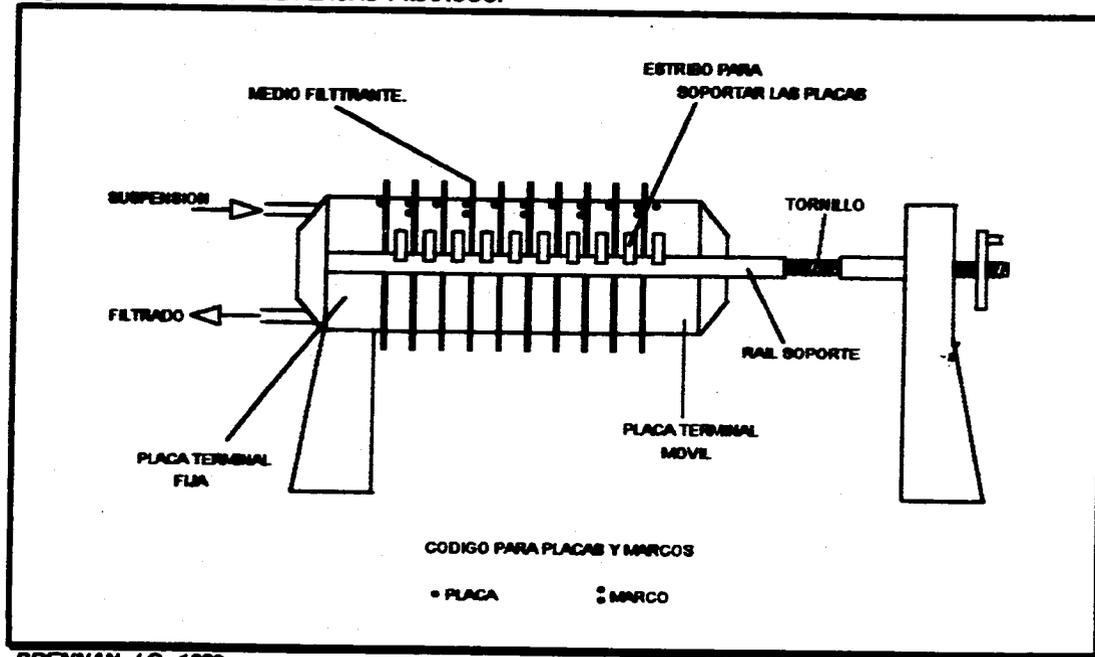
### **FILTROS DISCONTINUOS A PRESIÓN.**

Los filtros a presión pueden operar con una gran diferencia de presión a través del medio filtrante para obtener la filtración rápida y económica de líquidos viscosos o sólidos finos. Los tipos más comunes de filtros a presión son filtros prensa y filtros de hojas. A causa de la dificultad para descargar los sólidos a presiones superiores a la atmosférica, los filtros de presión son generalmente discontinuos.(39).

### **FILTROS PRENSA DE PLACAS Y MARCOS.**

El proceso intermitente del filtro prensa de placas y marcos se toma como característico para describir el proceso por lotes, este filtro es el más comúnmente utilizado en la industria (23), ya que puede emplearse frente a problemas con finalidades muy distintas (66).

Fig. 5. FILTRO PRENSA DE PLACAS Y MARCOS.



BRENNAN, J.G., 1980.

Un filtro prensa (Fig. 5) se compone de una serie de placas y marcos (Fig. 6a) independientes y móviles sobre un par de barras de apoyo horizontales, se prensa durante la filtración para formar un cierre a prueba de agua entre las dos placas terminales, una de las cuales es estacionaria. La prensa se puede cerrar manualmente, en forma hidráulica o por medio de un motor (26,46).

El medio filtrante se coloca entre placas y marcos (Fig. 6b). Cuando se establece la presión y el filtro está cerrado los orificios a y b en las placas, marcos y medio filtrante forman un tubo continuo.

La suspensión de alimentación se bombea por los conductos a penetrando al interior de cada uno de los marcos, de tal manera que la suspensión va llenando los espacios vacíos. El filtrado fluye a través del medio filtrante y, por la superficie acanalada de las placas del filtro se desplaza para salir al exterior por un canal de salida en cada placa hacia los ductos b, mientras los sólidos se acumulan como torta en ambos lados de los marcos (19,26).

La filtración se continúa hasta que el flujo de filtrado es menor que cierto límite práctico o la presión alcanza un nivel inaceptablemente elevado, debido al empaquetamiento denso de la torta en los marcos (8). Entonces, las placas y los marcos se separan y se extraen las tortas. Después se vuelve a armar el filtro y se repite el ciclo (2,18,32,40).

Si se desea lavar la torta, esta se deja en los marcos y se procede a un lavado sustituyendo el flujo de la suspensión de alimentación por el líquido de lavado; que puede ser el agua.

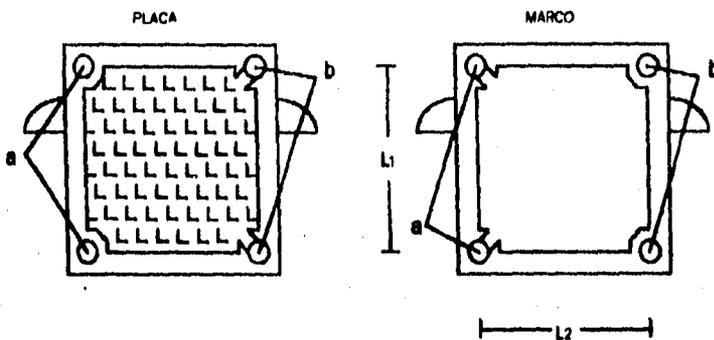
(8,19).

**PLACA.** La placa comprende una superficie original marginada y una parte central menos gruesa, que tiene ondulaciones o dibujos en relieve, por los cuales puede escurrir el filtrado, a pesar de que la presión de la bomba tiende a pegar la tela sobre la placa.

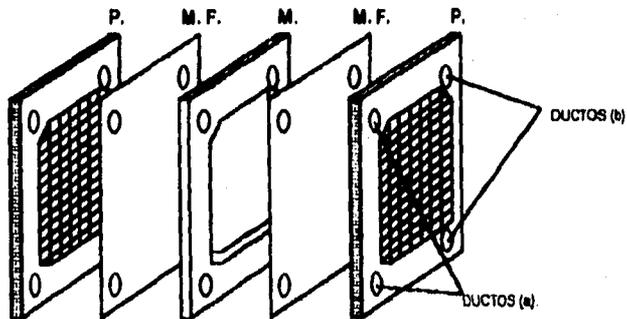
**MARCO.** El marco comprende la misma superficie marginal que la placa, pero está vacío en el interior.

Fig. 6. PLACAS Y MARCOS DE UN FILTRO PRENSA.

a) ESQUEMA DE LAS PLACAS Y MARCOS.



b) ARREGLO DE LAS PLACAS, MARCOS Y MEDIO FILTRANTE.



P. = Placa.

M. F. = Medio Filtrante.

M. = Marco

$L_1, L_2$  = Largo y ancho interior de los marcos.

## •ÁREA DE FILTRACIÓN.

El área de filtración, para cualquier filtro es igual a la superficie útil que presenta, al paso de la suspensión, el medio filtrante interpuesto.

En el filtro prensa de placas y marcos, el área de filtración tiene la siguiente expresión:

$$A = 2 L_1 L_2 \#MARCOS \quad (\text{Ec. 1.1})$$

donde:

$L_1$  y  $L_2$  = Largo y ancho interior de los marcos.

$\#MARCOS$  = Número de marcos del filtro prensa utilizados en la filtración.

(26).

## • VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL FILTRO PRENSA DE PLACAS Y MARCOS.

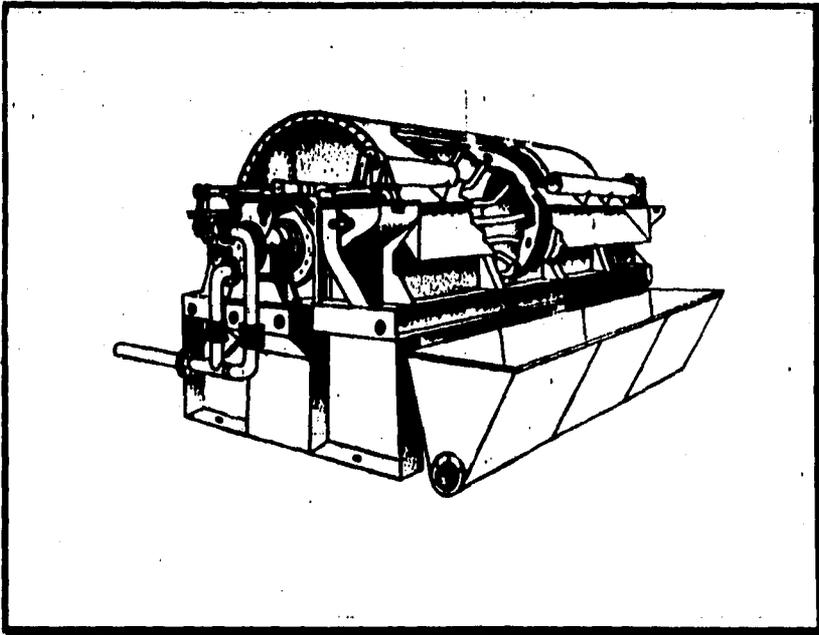
Las ventajas del filtro prensa son su sencillez, el bajo costo de capital, la flexibilidad y la capacidad para operar a alta presión. Los requerimientos de área de piso y altura por unidad de área del filtro son pequeños y la capacidad se puede ajustar mediante la adición o eliminación de las placas y marcos. Los filtros prensa se limpian fácilmente y el medio filtrante se puede reemplazar con facilidad. Con una operación adecuada se obtiene una torta más seca y densa, en comparación con la que se obtiene con la mayor parte de los otros filtros.

Existen varias desventajas serias que incluyen un lavado imperfecto, debido a la densidad variable de la torta, y una duración relativamente corta de la tela filtrante, debida al desgaste mecánico al vaciar y limpiar el filtro prensa (que a menudo incluye el raspado de la tela). Además los requerimientos de mano de obra son elevados. Con frecuencia estos filtros gotean o tienen fugas y en consecuencia crean problemas de limpieza, pero el mayor problema es la necesidad de abrir el filtro para descargar la torta. (40).

## **FILTROS DE VACÍO.**

En todos los filtros de vacío se succiona el líquido a través de un medio filtrante móvil, depositándose una torta de sólidos. Esta se saca de la zona de filtración, se lava, se seca por aspiración y se descarga del medio filtrante, que entra nuevamente a la suspensión para tomar otra carga de sólidos. Una parte del medio filtrante está en todo momento en la zona de filtración, otra en la zona de lavado y otra en la zona de descarga de sólidos, de forma que tanto la descarga de sólido como la de líquido son continuas. La diferencia de presiones a través del medio filtrante en un filtro continuo de vacío no es elevada. Los distintos tipos de filtros difieren en el modo de admisión de la suspensión, la superficie filtrante y la de descarga de sólidos. Sin embargo, todos ellos aplican el vacío desde una fuente estacionaria a las partes móviles del aparato, a través de una válvula rotatoria (30).

**Fig. 7. FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO.**

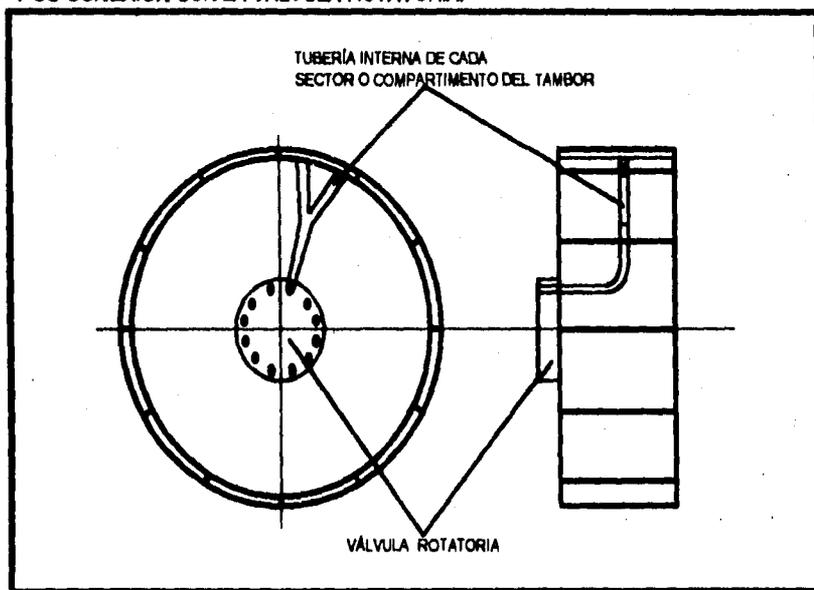


**JOHNS MANVILLE MEXICANA, S.A., 1980.**

## FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO.

Los filtros de tambor rotatorio (Fig. 7) están compuestos por un tambor rotatorio cilíndrico que gira al rededor de su eje horizontal. Dicho tambor está dividido en un cierto número de sectores o compartimentos poco profundos. Los compartimentos del tambor presentan una conexión por separado entre cada uno de ellos y una válvula rotatoria automática especial situada centralmente en uno de los extremos del tambor (Fig. 8). La superficie del tambor está cubierta totalmente por el medio filtrante (8,10).

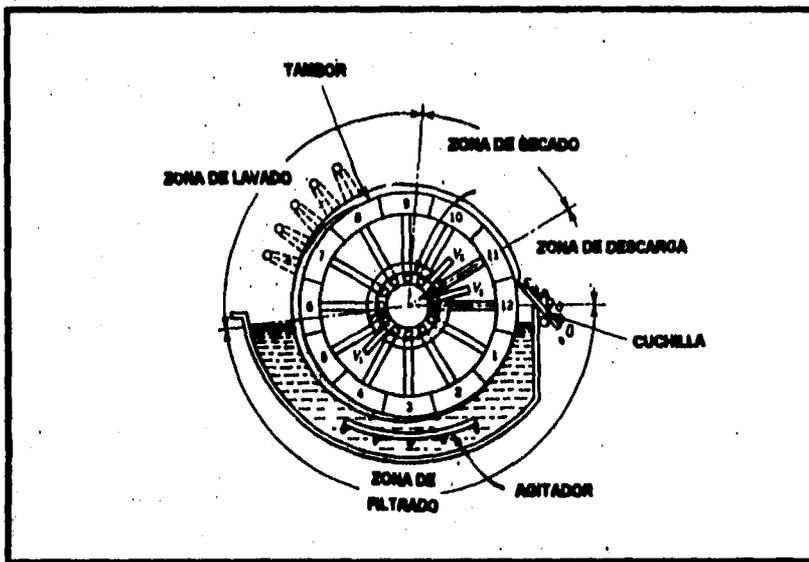
Fig. 8. ESQUEMA DEL TAMBOR, EN EL QUE SE MUESTRAN LOS COMPARTIMENTOS Y SU CONEXIÓN CON LA VÁLVULA ROTATORIA.



El tambor se encuentra sumergido parcialmente en un cuba abierta que contiene la suspensión a filtrar. La cuba soporta los ejes del tambor, la cuchilla que ayuda a descargar los sólidos y el agitador que tiene en su interior para evitar la sedimentación y acumulación de sólidos (41). La aplicación de vacío al medio filtrante,

por medio de la válvula rotatoria a cada compartimento, origina la formación de una torta sobre la superficie exterior del tambor, conforma este va girando dentro de la suspensión (10). En la figura 9 ésta parte del ciclo en el tambor se denomina zona de filtración. El espesor de la torta formada depende de la velocidad de rotación del tambor, pues entre mayor sea la velocidad de rotación ésta es mas delgada y en consecuencia la velocidad de filtración aumenta (10).

**Fig. 9. ESQUEMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO MOSTRANDO LAS DIFERENTES ZONAS.**



**BROWN, G. G., 1961.**

La torta emerge de la suspensión y pasa a una zona de lavado desconectándose de la zona de filtrado, para así retirar el líquido de lavado por separado. De ahí la torta pasa a una zona de secado parcial por medio de una corriente de aire. Posteriormente al compartimento, en otra zona denominada de descarga, se le introduce aire comprimido entre el medio filtrante, para separar la torta de la superficie del medio y desprenderla con la ayuda de la cuchilla. Después el

compartimento vuelve a entrar a la zona de filtración y comienza un nuevo ciclo. Resulta así que cada compartimento se comporta como un filtro individual operando en una secuencia tal, que la operación se convierte en una descarga continua de filtrado y de torta de filtración.

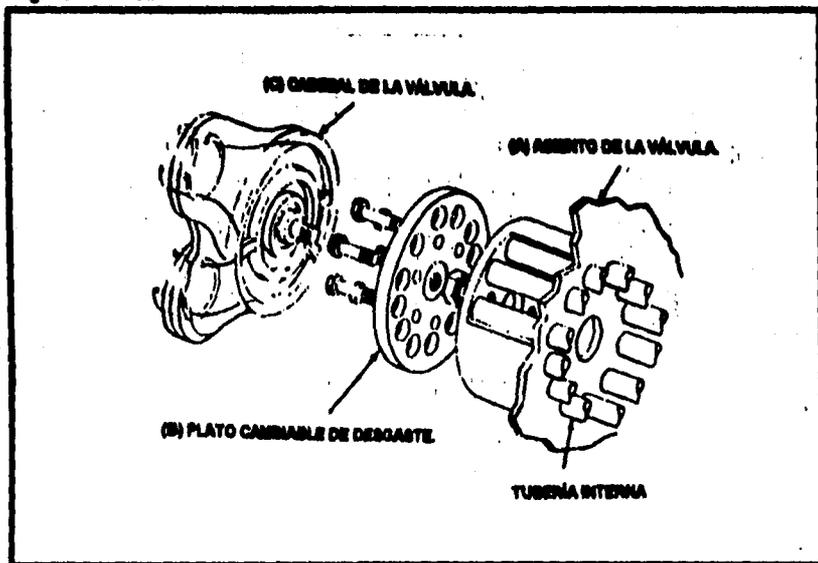
En el filtro de tambor rotatorio el cambio de una zona a otra conforme gira el tambor es controlado, en todo momento, por la válvula rotatoria.

(3,5,9,10,16,39,41).

### • VÁLVULA ROTATORIA.

La válvula rotatoria tiene la función de controlar las diferentes etapas del proceso de filtración, y consta de tres componentes principales, los dos primeros en rotación con el tambor y el tercero estacionario:

Fig. 10. VÁLVULA ROTATORIA.



PERRY, R. H., 1992.

a) Asiento de la válvula, que consiste en un disco plano con orificios que conectan con los sectores del filtro (Fig. 10a).

b) Plato cambiable de desgaste, provisto de orificios correspondientes a los del asiento de la válvula y que gira en contacto con ésta (Fig. 10b).

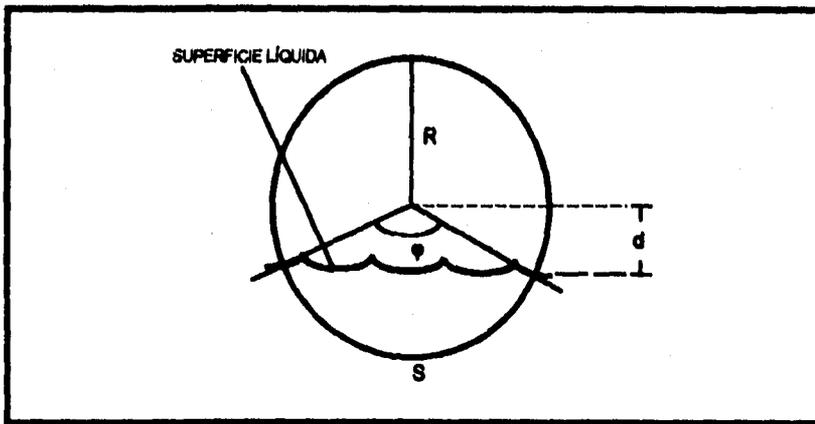
c) Cabezal de la válvula, provisto de una ranura anular que conecta con la salida del filtrado (zona de filtración), la entrada del líquido de lavado (zona de lavado), la conexión de vacío para secar la torta (zona de secado), y el aire comprimido para desprendimiento de la misma (zona de descarga), por lo que cada compartimento por turno esta frente a estas conexiones (Fig. 10c).

(10).

#### • ÁREA DE FILTRACIÓN.

En el caso del filtro de tambor rotatorio, el área de filtración como tal, corresponde al área sumergida del tambor, sin embargo, después del primer ciclo, el área corresponde a la filtración realizada a lo largo de toda la superficie del tambor.

Fig. 11. ESQUEMA DEL TAMBOR SUMERGIDO PARA CALCULAR EL ÁREA DE FILTRACIÓN.



De lo anterior, la fracción disponible del tambor para la formación de la torta se expresa como:

$$f = \frac{A}{AT} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

donde:

**f** = Fracción sumergida del tambor en la suspensión.

**A** = Área disponible para la filtración en el tambor.

**AT** = Área total de filtración

Por tratarse, el tambor, de un cilindro el área total se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$AT = \pi D_t L_t \quad (\text{Ec. 1.3})$$

donde:

**D<sub>t</sub>** = Diámetro del tambor.

**L<sub>t</sub>** = Espesor del tambor.

El área sumergida del tambor se puede obtener mediante las siguientes ecuaciones:

$$A = S L_t \quad (\text{Ec. 1.4})$$

donde:

**S** = Arco sumergido del tambor (Ver Fig. 11).

$$S = \varphi R \quad (\text{Ec. 1.5})$$

siendo:

$\phi$  = El ángulo de sumergencia.

R = Radio del tambor.

El ángulo de sumergencia se expresa como:

$$\phi = 2 \text{ arc cos } ( d / R )$$

donde:

d = Distancia desde el centro del tambor a la superficie líquida.

Se sustituyen las ecuaciones 1.3 y 1.4 en la ecuación 1.2:

$$f = \frac{S}{\pi D t}$$

En la ecuación anterior se puede sustituir la ecuación 1.5 y  $D t = 2 R$ :

$$f = \frac{\phi}{2 \pi} = \frac{\phi}{360^\circ} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

#### **• VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO.**

Las ventajas de los filtros de tambor rotatorio son: costo de mano de obra pequeño, 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 fáciles de descargar. Es difícil obtener tortas secas y el costo del equipo, incluyendo el sistema de vacío, es bastante elevado (6).

### 1.2.3. CAPACIDAD DE UN FILTRO.

La capacidad de un filtro se expresa como la cantidad de volumen de filtrado obtenido por tiempo del ciclo y unidad de área de filtración, es decir,

$$\text{Capacidad} = \frac{V_f}{\theta_c A} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

donde:

$V_f$  = Volumen de filtrado total obtenido.

$\theta_c$  = Tiempo del ciclo de filtración.

$A$  = Área de filtración.

(39).

### TIEMPO TOTAL DEL CICLO DE FILTRACIÓN.

La operación de filtración se realiza en cuatro etapas, que se conocen como: filtración, lavado de la torta, secado de la torta y descarga.

La etapa de filtración comprende únicamente el tiempo en el que se realiza la filtración propiamente dicho, en esta parte se ha recolectado el volumen total de filtrado obtenido en el ciclo.

El lavado de la torta, se realiza, si se desea eliminar el residuo de filtrado en la torta porque esta sea el producto valioso en la separación o porque existe alguna sustancia soluble en el líquido de lavado que se quiera eliminar de la torta. Esta etapa no se realiza en todos los procesos de filtración.

Después de la etapa de filtración o la de lavado tenemos una torta húmeda , que si se desea secar pasa a una etapa donde se aplica aire a presión (en el caso de filtros a presión) o se succiona (para filtros a vacío) para obtener una torta lo más seca posible.

Por último, tenemos la etapa de descarga, que se refiere, para el caso de un proceso intermitente (batch), a abrir el equipo, descargar la torta, limpiar el equipo y volverlo a armar, para iniciar un nuevo ciclo. En el caso de los filtros continuos se refiere a la etapa de desprendimiento de la torta.

Entonces, el tiempo total del ciclo esta representado por la siguiente expresión:

$$\theta_c = \theta_f + \theta_w + \theta_s + \theta_d \quad (\text{Ec. 1.8})$$

dónde:

$\theta_f$  = Tiempo de filtración.

$\theta_w$  = Tiempo de lavado.

$\theta_s$  = Tiempo de secado.

$\theta_d$  = Tiempo de descarga.

En un filtro de tambor rotatorio el tiempo del ciclo es igual al tiempo que tarda en dar una vuelta completa el tambor, pues en su giro realiza todas las etapas del ciclo.

## **1.2.4. APLICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.**

El jarabe procedente de la extracción de azúcar de la caña de azúcar contiene gran cantidad de impurezas sólidas, que se separan, principalmente, por sedimentación; el líquido remanente está todavía bastante lejos de ser puro, por lo que se filtra a continuación. Debido a la naturaleza compresible de los sólidos se toman precauciones especiales para producir la floculación de sólidos antes de la filtración. Para esta aplicación son muy útiles los filtros de vacío de tambor rotatorio. En cierto momento de la extracción de azúcar de remolachas, el jarabe se limpia de impurezas sólidas por filtración después de tratamiento adecuado y previo para provocar la sedimentación. Para este fin también se utilizan filtros de tambor rotatorio, así como también se han utilizado los filtros prensa de placas y marcos.

Los filtros de tambor rotatorio se han utilizado ampliamente en el sector enológico (elaboración de vinos) para la filtración de líquidos cargados con sustancias sólidas o coloidales como son mostos recién prensados, fondos de mosto decantados, heces de vino, de clarificación y de descarga centrífuga, separación de cristales de bitartrato, etc.. También se utilizan en la clarificación de jugos de frutas.

Los filtros prensa de placas y marcos se utilizan en las fábricas de cerveza para filtrar la masa y recuperar la levadura después de la fermentación.

En general, los filtros a presión se utilizan en procesos de elaboración de vinos, refrescos, vinagre jugos de frutas, levaduras y extractos de carne, aceites de mesa y para ensaladas, salmueras, jarabes de azúcar y gelatina. Los sólidos de estos productos son, en general, muy finos y/o de naturaleza coloidal o micelaginoso. Casi siempre se utilizan ayuda-filtros en forma de precapa y/o dosificación.

## **1.3. FUNDAMENTOS DE LA FILTRACIÓN.**

Un filtro, desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, es un sistema de flujo; donde, por medio de una diferencia de presión aplicada entre la entrada de la suspensión y la salida del filtrado, se obliga a éste a circular a través del equipo. Durante la filtración los sólidos de la suspensión permanecen en el equipo y forman un lecho de partículas (torta de filtración), a través del cual tiene que fluir el filtrado. Éste pasa a través de tres resistencias en serie:

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

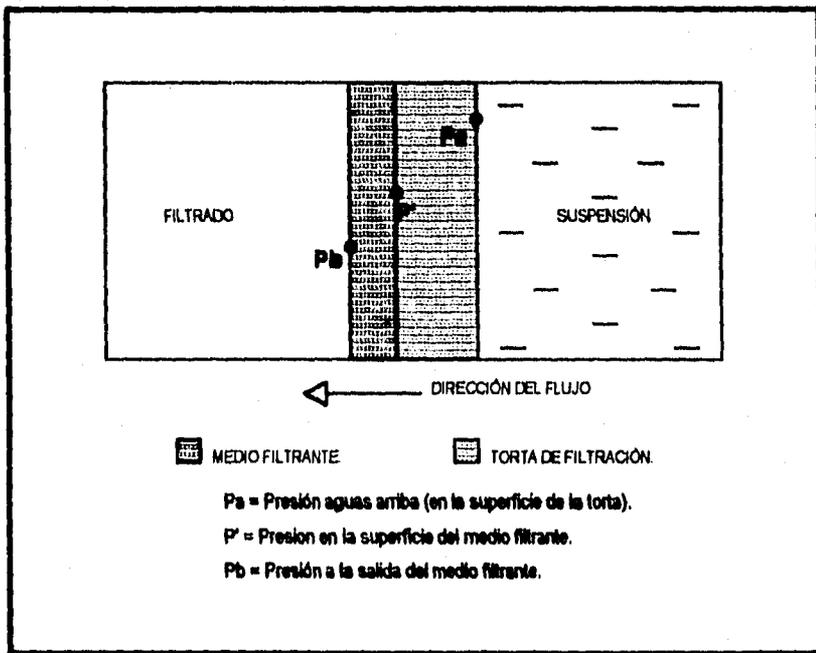
### **1.3.1. DISTRIBUCIÓN DE LA CAÍDA TOTAL DE PRESIÓN.**

La diferencia de presión total en el filtro puede igualarse a la suma de las diferencias de presión individuales, debido a que el flujo es en serie.

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. En la operación real la resistencia correspondiente al medio filtrante

es mayor que la que presenta un medio filtrante limpio que opera con filtrado claro. Durante los primeros momentos de la filtración, incluyendo la de las partículas incrustadas se llama *resistencia del medio filtrante* y es importante durante los primeros momentos de depósito. La resistencia que ofrecen los sólidos, y que no se debe al medio filtrante, se llama *resistencia específica de la torta*. La resistencia específica de la torta es cero al iniciar la filtración y, a causa de la deposición continua de sólidos sobre el medio, aumenta continuamente con el tiempo de filtración.

Fig. 12. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN MEDIO FILTRANTE Y LA TORTA MOSTRANDO LOS GRADIENTES DE PRESIÓN.



Ya que puede desprejarse la resistencia de las conducciones, la diferencia global de presión es igual a la suma de las diferencias de presión sobre el medio y la

torta. Si  $P_a$  es la presión de entrada,  $P_b$ , la de salida, y  $P'$ , la presión en el límite de separación entre la torta y el medio,

$$(-\Delta P)_T = (P_a - P') + (P' - P_b)$$

$$(-\Delta P)_T = (-\Delta P)_c + (-\Delta P)_m \quad (\text{Ec. 1.9})$$

siendo:

$(-\Delta P)_T$  = Caída de presión total en el sistema.

$(-\Delta P)_m$  = Caída de presión en el medio filtrante.

$(-\Delta P)_c$  = Caída de presión en la torta.

El signo negativo (-) que antecede  $\Delta$ , indica que va de una zona de mayor presión a una de menor presión.

(8,17,19,39,44).

## 1.4. ECUACIÓN GENERAL DE FILTRACIÓN.

La filtración es una función de las fuerzas manejadas ( como: gravedad, presión, vacío o centrifuga), que corresponden a la fuerza impulsora que produce el flujo de la suspensión a través del medio filtrante, y también, es una función inversa de las resistencias (como: la del medio filtrante, torta de filtración y por tuberías y accesorios) que se oponen al flujo del fluido.

$$\text{Filtración} = f \left( \frac{\text{Fuerzas manejadas}}{\text{Resistencias}} \right)$$

### 1.4.1. VELOCIDAD DE FILTRACIÓN.

Cuando se efectúa la filtración de una suspensión, sobre la superficie del medio filtrante queda depositada una torta constituida por las partículas sólidas retenidas, generalmente de forma y dimensiones irregulares, cuyo espesor va creciendo a medida que la filtración progresa por el aporte de nuevas cantidades de sólido. El fluido debe atravesar, en consecuencia, no tan sólo el medio filtrante como sucede al comienzo de la filtración sino también la torta depositada a través de los poros y canales que se forman en las partículas ya separadas.

El flujo de fluido a través de los poros y canales de la torta y del medio filtrante, está regido por la Ley de POISEUILLE, correspondiente a un deslizamiento relativamente lento y sin turbulencias. Este flujo "viscoso", según se a podido medir en tubos capilares (que imaginariamente podrían asemejarse a los tortuosos caminos reales de los poros en una torta o medio filtrante cualquiera), se puede expresar matemáticamente con la siguiente expresión:

$$(-\Delta P)_f = \frac{32 L_c v \mu}{g D_c^2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

donde:

$(-\Delta P)_f$  = Pérdida de carga debida a la fricción.

$L_c$  = Longitud del capilar.

$v$  = Velocidad de flujo.

$\mu$  = Viscosidad del fluido.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$D_c$  = Diámetro del capilar.

El valor de  $(-\Delta P)_f$ , pérdida de carga, puede interpretarse como la diferencia de presión que es necesario mantener en ambas caras del filtro para un determinado flujo de líquido, o sea,  $(-\Delta P)_T$

$$v = \frac{g D_c^2 (-\Delta P)_T}{32 L_c \mu} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

La velocidad de filtración, definida como la velocidad de pasaje de un fluido conteniendo en suspensión partículas sólidas a través de un medio filtrante, es expresada en base al volumen de filtrado en unidad de tiempo:

$$\text{Velocidad de filtración} = \frac{\text{Volumen de filtrado}}{\text{Unidad de tiempo}}$$

Como esta velocidad puede variar a medida que transcurre el tiempo, es mejor utilizar el concepto de velocidad instantánea de filtración, el infinitésimo de volumen de líquido recogido durante un infinitésimo tiempo en cualquier momento de la filtración.

$$v_f = \frac{dV}{d\theta} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

donde:

$v_f$  = Velocidad de filtración.

$\theta$  = tiempo.

$V$  = Volumen de filtrado.

La velocidad de filtración es directamente proporcional a la velocidad de pasaje del fluido a través de los poros y canales de la torta y del medio filtrante y estará influido por los mismos factores que se han considerado en la ecuación de flujo de Poiseuille, pero también por el número de canales existentes en la unidad de superficie del medio filtrante y la superficie total de éste.

La cantidad de poros existentes, el tamaño y características de los mismos pueden ser involucrados en una misma constante empírica, particular para cada tipo de torta y de medio filtrante, definida como *permeabilidad*. En general se puede decir, que la permeabilidad de la torta depositada es el factor limitante de la velocidad de filtración, adquiriendo una muy pequeña importancia la correspondiente al medio filtrante.

Según lo anterior, la velocidad instantánea de filtración estará dada por:

$$\frac{dV}{d\theta} = A k \frac{(-\Delta P)T}{\mu L} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

o ecuación de KOZENY, donde:

A = Área de filtración.

k = permeabilidad.

$(-\Delta P)T$  = Caída de presión total en el sistema.

L = Espesor de la torta.

$\mu$  = Viscosidad del filtrado.

Como la velocidad de filtración, lo mismo que cualquier otra velocidad, depende del equilibrio de dos factores que como ya se mencionaron son: la fuerza impulsora y la resistencia que se opone. Se puede decir que la ecuación 1.13, representa:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Fuerza de impulsión}}{\text{Resistencia}}$$

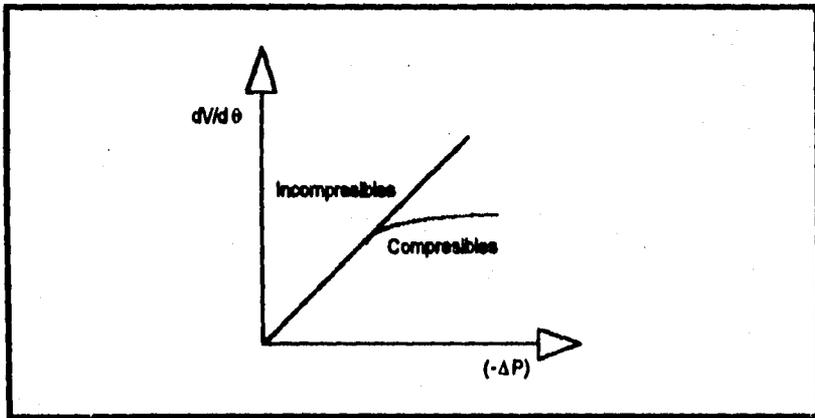
La resistencia opuesta al paso del fluido es función del espesor (L) de la torta y, por lo tanto, es creciente a medida que aumenta el espesor de ésta a consecuencia del

depósito de nuevas cantidades de sólidos; es función también de la viscosidad del fluido y, fundamentalmente, es función de la permeabilidad de la torta depositada.

Con el objeto de mantener un flujo uniforme a medida que progresa la filtración, se aumenta progresivamente la presión actuante sobre el sistema (fuerza impulsora) y en este aspecto dependiendo del tipo de torta que formen los sólidos (compresible o incompresible) modificarán o no sus características de permeabilidad modificando el flujo conseguido.

En la figura 13, se puede observar que en las tortas incompresibles, la velocidad de filtración será directamente proporcional a la presión aplicada (con los restantes factores constantes) según la aplicación de la Ec. 1 13.

**Fig. 13. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE TORTAS.**



HELMAN, J., 1981.

En las tortas compresibles, el aumento de la presión tiende a modificar la forma de las partículas produciendo la obturación total o parcial de los poros o canales de la torta, modificando, en consecuencia, su permeabilidad.

(21,22,24).

## 1.4.2. DESARROLLO TEÓRICO PARA ESTABLECER LA ECUACIÓN GENERAL DE FILTRACIÓN.

La ecuación general de filtración se basa en la ecuación de Kozeny y Carman, que describe el flujo de un fluido a través lechos empacados.

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A (-\Delta P) T}{(K V + R_m) \mu}$$

(Ec. 1.14)

La ecuación anterior representa la velocidad filtración como una función de las fuerzas manejadas entre la suma de las resistencias que se oponen al paso del filtrado. Dicha ecuación es conocida como la **ECUACIÓN GENERAL DE FILTRACIÓN**, donde:

**V** = Volumen de filtrado.

**$\theta$**  = Tiempo de filtración.

**A** = Área de filtración.

**$(-\Delta P)T$**  = Caída de presión total en el sistema.

**K** = Factor donde se encuentra implícita la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ).

**$R_m$**  = Resistencia del medio filtrante.

**$\mu$**  = Viscosidad del filtrado.

Para establecer la ecuación 1.14, se hace necesario partir de las diferencias de presiones en serie que se manejan.

## CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DE LA TORTA.

El flujo a través de la cama empacada es análogo al que ocurre a través de un conjunto de tubos circulares rectos, cuyo diámetro se puede evaluar en base al concepto de radio hidráulico (RH).

$$RH = \frac{\text{Volumen vacío del empacado.}}{\text{Área superficial del empacado.}}$$

$$RH = \frac{\xi V_p N_p}{(1-\xi) N_p S_p} = \frac{\xi V_p}{(1-\xi) S_p} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

donde:

$N_p$  = Número de partículas en el empacado.

$V_p$  = Volumen de las partículas.

$S_p$  = Área superficial o superficie de las partículas.

$\xi$  = Porosidad. Representa la fracción de espacios vacíos en el empacado, cuyo valor máximo es igual a 1.

$(1-\xi)$ , representa a todos los sólidos.

$$\xi = \frac{\text{Volumen de huecos en la torta}}{\text{Volumen total del empacado (torta)}}$$

Considerando que el haz de tubos circulares a través del cual fluye el filtrado es relativamente pequeño, el flujo a través de los mismos se considera laminar, y sigue la ecuación de KOZENY-CARMAN:

$$\frac{(-\Delta P)_c}{L} = \frac{4.17 \mu q (1-\xi)^2 a_v^2}{A \xi^3} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

donde:

$(-\Delta P)_c$  = Caída de presión a través de la torta.

$L$  = Espesor de la torta.

$q$  = Flujo volumétrico.

$A$  = Área de sección transversal al flujo o área de filtración.

$\rho$  = Densidad del filtrado.

$a_v$  = Superficie específica de las partículas

Estableciendo la Ec. 1.13 en función de la masa de sólidos:

$$m = \rho_p V_p$$

donde:

$m$  = masa de sólidos

$\rho_p$  = Densidad de las partículas.

$$V_p = A(1-\xi) L$$

$$m = A(1-\xi) L \rho_p \quad (\text{Ec. 1.17})$$

despejando  $L$ ,

$$L = \frac{m}{A(1-\xi) \rho_p} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Introduciendo los valores en una misma constante y sustituyendo la relación de  $L$  en la Ec. 1.16 queda:

$$(-\Delta P)_c = K_1 \frac{\mu q (1-\xi) m}{A^2 \xi^2 \rho_p} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Durante la caracterización de las tortas de filtración se define un término como *resistencia específica de la torta* ( $\alpha$ ), el cual, puede variar conforme varía el espesor de la torta.

Para un espesor diferencial:

$$-dP_c = K_1 \frac{\mu q (1-\xi) m}{A^2 \xi^3 \rho_p} dm$$

$$\alpha_1 = K_1 \frac{(1-\xi)}{\rho_p \xi^3}$$

donde:

$\alpha_1$  = Resistencia específica de la torta puntual.

$$-dP_c = \alpha_1 \frac{\mu q}{A^2} dm \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Integrando queda:

$$(-\Delta P)_c = \frac{\alpha \mu q}{A^2} m$$

La masa de sólidos también está dada por:

$$m = V C \quad (\text{Ec. 1.21})$$

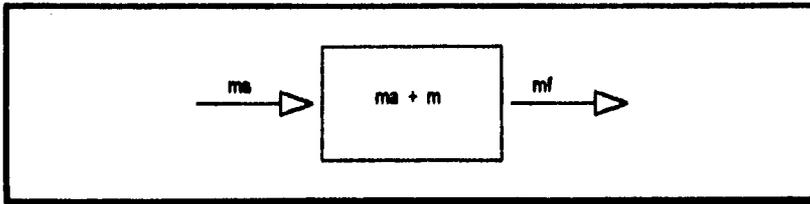
donde:

$V$  = Volumen de filtrado.

$C$  = Masa de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado.

A través de un balance de materiales se puede definir el valor de  $C$ .

Fig. 14. ESQUEMA DEL BALANCE DE MATERIALES PARA DEFINIR EL VALOR DE C.



donde:

- $m_a$  = Masa de la suspensión.       $m_a$  = Masa de filtrado acumulado en la torta.
- $m_f$  = Masa de filtrado.
- $m$  = Masa de sólidos acumulados en el filtro.

A un tiempo definido:

$$m_a = m_f + m_a + m \quad (\text{Ec. 1.22})$$

$$s = \frac{m}{m_a}$$

donde:

- $s$  = Relación masa de sólidos a masa de suspensión o fracción masa de sólidos en la suspensión.

La relación masa de torta húmeda a torta seca ( $m_o$ ) es:

$$m_o = \frac{m + m_a}{m}$$

La fracción masa de sólidos en la torta húmeda es el inverso de  $m_o$ :

$$\frac{1}{m_o} = \frac{m}{m_a + m}$$

Dividiendo la Ec. 1.26 entre  $m$  queda como:

$$\frac{1}{s} = \frac{m_f}{m} + m_o$$

ahora despejando la masa de sólidos, tenemos que:

$$m = m_f \frac{s}{1 - m_0 s} \quad (\text{Ec. 1.23})$$

La masa de filtrado, esta dada por:

$$m_f = \rho V_f$$

e introduciéndola en la Ec. 1.23 queda:

$$m = V_f \frac{s \rho}{(1 - m_0 s)} \quad (\text{Ec. 1.24})$$

por analogía con la Ec. 1.21, tenemos que la cantidad de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado se expresa como:

$$C = \frac{s \rho}{1 - m_0 s} \quad (\text{Ec. 1.25})$$

Escribiendo la Ec. 1.24 en forma diferencial:

$$dm = \frac{s \rho}{(1 - m_0 s)} dV_f \quad (\text{Ec. 1.26})$$

$$dm = C dV_f$$

Sustituyéndola en la ecuación 1.20

$$-dP_c = \alpha_1 \frac{\mu q}{A^2} C dV_f \quad (\text{Ec. 1.27})$$

de la Ec. 1.27, se parte para caracterizar las tortas de filtración.

Para una torta incompresible; integrando la Ec. 1.27 entre los límites de  $P'$  a  $P_a$  (Ver Fig. 12):

$$\int_{P'}^{P_a} dP = \alpha \frac{\mu q}{A^2} C \int_0^V dV$$

$$(-\Delta P)_c = \alpha \frac{\mu q}{A^2} C V \quad (\text{Ec. 1.28})$$

La ecuación anterior corresponde a la caída de presión para una torta incompresible, en donde,  $\alpha$  es constante para un espesor definido de torta. Y por lo tanto, a diferentes presiones para cada espesor de torta, también  $\alpha$  es constante.

Para una torta compresible:

$$-dP_c = d(P_a - P')$$

aplicándola en la Ec. 1.27.

$$d(P_a - P') = \alpha \frac{\mu q}{A^2} C dV$$

integrando

$$\int_{P'}^{P_a} \frac{d(P_a - P')}{\alpha} = \int_0^V dV \quad (\text{Ec. 1.29})$$

de la Ec. 1.28 se deduce que:

$$\frac{(-\Delta P)_c}{\alpha} = \frac{\mu q C}{A^2} V \quad (\text{Ec. 1.30})$$

comparando con la ecuación 1.29, queda:

$$(-\Delta P)_c = \alpha \int_{P'}^{P_a} \frac{d(P_a - P')}{\alpha}$$

por lo tanto,

$$\alpha = \frac{(-\Delta P)_c}{\int_{P^a-P^r}^0 \frac{d(P^a - P^r)}{\alpha_1}} \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Si  $\alpha$  varía es un torta compresible y, si es constante es una torta incompresible.

Independientemente de la torta que se trate, en la caída de presión se emplea la Ec. 1.27.

### **CAÍDA DE PRESIÓN A TRAVÉS DEL MEDIO FILTRANTE.**

La caída de presión a través del medio filtrante  $(-\Delta P)_m$ , puede definirse por analogía con la ecuación 1.28:

$$(-\Delta P)_m = \frac{\mu q}{A} R_m \quad (\text{Ec. 1.32})$$

donde:

$R_m$  = Resistencia específica del medio filtrante.

$R_m$  es igual a:

$$R_m = \frac{\alpha C V_m}{A} \quad (\text{Ec. 1.33})$$

donde:

$V_m$  = Volumen hipotético de filtrado expresado en términos de la resistencia que representa un espesor hipotético de torta.

La resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ), para una alimentación y condiciones de operación dadas es una constante.

Integrando las ecuaciones 1.17 y 1.26, en las cuales se esta dividiendo la masa de sólidos que se están depositando.

de Ec. 1.17  $m = (1-\xi) A \rho_p L_m$  (Ec. 1.34)

de Ec. 1.26  $m = \frac{s \rho}{(1 - m_0 s)} V_m$  (Ec. 1.35)

igualando las ecuaciones 1.34 y 1.35:

$$(1-\xi) A \rho_p L_m = \frac{s \rho}{(1 - m_0 s)} V_m$$

despejando la relación  $V_m/A$ , tenemos:

$$\frac{V_m}{A} = \frac{(1-\xi) \rho_p (1-m_0 s) L_m}{s \rho} = \frac{(1-\xi) \rho_p L_m}{C}$$

en donde:

$L_m$  = Espesor hipotético de torta.

sustituyendo en la Ec. 1.33 y despejando  $R_m$ :

$$R_m = \alpha C \frac{(1-\xi) \rho_p L_m}{C}$$

$$R_m = \alpha (1-\xi) \rho_p L_m \quad (\text{Ec. 1.36})$$

La ecuación anterior representa a  $R_m$  en función de un espesor hipotético de torta.

## CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL EN EL SISTEMA.

Sustituyendo las ecuaciones 1.28 y 1.32 en la ecuación 1.9, la caída de presión total en el sistema queda:

$$(-\Delta P)_T = \frac{\alpha \mu q C V}{A^2} + \frac{\mu q R_m}{A} \quad (\text{Ec. 1.37})$$

o bien:

$$(-\Delta P)_T = \frac{\mu q}{A} \left[ \frac{\alpha C V}{A} + R_m \right] \quad (\text{Ec. 1.38})$$

Si despejamos el flujo volumétrico (q), queda:

$$q = \frac{(-\Delta P)_T A}{\left[ \frac{\alpha C V}{A} + R_m \right] \mu}$$

sabiendo que (q) está expresado en términos de volumen con respecto al tiempo y; sabiendo que existe una variación llegamos a la ecuación 1.14 (Ecuación general de filtración), y de ahí se deduce que; la K manejada en esta ecuación, está en función de la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ):

$$K = \frac{\alpha C}{A} \quad (\text{Ec. 1.39})$$

(3,6,8,20,30,39,44,45,46,47,48,49,50,53,62).

### 1.4.3. ECUACIONES PARA FILTRACIÓN INTERMITENTE.

Las ecuaciones para filtración intermitente se aplican según el régimen de filtración que se este manejando en el proceso.

Por los valores que puede tener la presión a lo largo del proceso se puede efectuar bajo los regímenes de filtración a presión constante, a velocidad de flujo constante o rímbto.

#### **RÉGIMEN DE FILTRACIÓN A PRESIÓN CONSTANTE.**

Este se realiza cuando se filtra una suspensión que forma una torta poco compresible, aquí la suspensión llega al filtro desde el primer momento con una presión que se ha de mantener durante toda la operación, lo cual implica que la velocidad de filtración ha de ir disminuyendo paulatinamente, pues a medida que crece el espesor de la torta la resistencia a la filtración es mayor, evidentemente.

Por el contrario, si se trata de sólidos compresibles, la primera fracción de sólidos depositados en el medio filtrante resulta poco permeable por actuar sobre ella una presión muy fuerte, alargando el periodo de filtración o la necesidad de descargar la torta en poco tiempo para seguir filtrando.

Cuando la caída de presión es constante, las únicas variables en la ecuación general de filtración (Ec. 1.14) son el volumen de filtrado ( $V$ ) y el tiempo ( $\theta$ ), por lo que la ecuación puede integrarse de la siguiente forma:

$$K \int_0^V V dV + Rm \int_0^V dV = \frac{A}{\mu} (-\Delta P) \int_0^\theta d\theta$$

$$(\theta_f - \theta) = \frac{K \mu}{A^2 (-\Delta P) T} (V_f^2 - V^2) + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P) T} (V_f - V) \quad (\text{Ec. 1.40})$$

siendo:

$V$  = Volumen de filtrado inicial.

$\theta$  = Tiempo de filtrado inicial.

$V_f$  = Volumen de filtrado final.

$\theta_f$  = Tiempo de filtrado final.

Suponiendo que el tiempo se cuenta desde el instante en que se obtiene la primera gota de filtrado, entonces se considera que al inicio, cuando  $V = 0$ ,  $\theta = 0$ . Por lo tanto, la ecuación 1.40, queda:

$$\theta_f = \frac{K \mu}{A^2 (-\Delta P) T} V_f^2 + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P) T} V_f \quad (\text{Ec. 1.41})$$

o bien:

$$\theta_f = \frac{\alpha C \mu}{A^2 2 (-\Delta P) T} V_f^2 + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P) T} V_f \quad (\text{Ec. 1.42})$$

La ecuación anterior, se aplica a tortas incompresibles, y permite conocer el tiempo de filtración en función al volumen de filtrado cuando los demás términos son constantes.

### • COMPRESIBILIDAD DE LA TORTA

La ecuación general de filtración como vimos, se basa en la ecuación de Kozeny y Carman que a su vez considera que la ley de Poiseuille es válida, pues supone la cama formada por ductos de diámetro constante y por lo tanto el gasto del filtrado es directamente proporcional a la presión.

En los casos en los que la compresibilidad de la torta es considerable, la ley de Poiseuille no es aplicable, ya que el gasto no aumenta en proporción directa a la presión. En estos casos el aumento de la presión produce una disminución del diámetro de los canales a través de los cuales fluye el filtrado, debido a la deformación de las partículas sólidas lo que trae como consecuencia un aumento en la resistencia específica de la torta.

La siguiente relación empírica se ha sugerido para la relación entre  $\alpha$  y  $(-\Delta P)$ :

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta P)^s \quad (\text{Ec. 1.43})$$

donde:

$s$  = Índice de compresibilidad de la torta.

$\alpha_0$  = Resistencia al inicio del depósito de sólidos.

Aplicando logaritmos queda:

$$\log \alpha = s \log (-\Delta P) + \log \alpha_0 \quad (\text{Ec. 1.44})$$

La ecuación anterior representa una línea recta, donde el índice de compresibilidad ( $s$ ) corresponde a la pendiente.

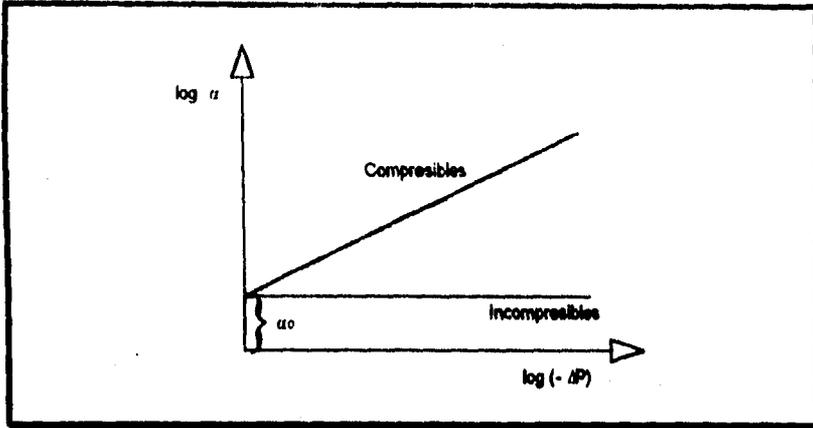
El índice de compresibilidad de la torta es una medida cuantitativa de la compresibilidad de la torta y toma valores de 0 a 1.

Teóricamente se dice que cuando  $s = 0$ , la torta es incompresible; y si  $s = 1$ , la torta es completamente compresible.

En la práctica los valores del índice de compresibilidad ( $s$ ) se encuentran en el intervalo:  $0.2 \leq s \leq 0.8$ .

(25).

Fig. 15. EFECTO DE LA PRESIÓN SOBRE LA RESISTENCIA ESPECÍFICA DE LA TORTA.



GUTIÉRREZ C., E., 1996.

La figura 15 muestra una gráfica que representa la Ec. 1.44, donde se observa, que para torta incompresibles  $\alpha$  se mantiene constante a medida que aumenta la presión, mientras que, para las torta compresibles la resistencia va aumentando conforme aumenta la presión.

### **RÉGIMEN DE FILTRACIÓN A VELOCIDAD DE FLUJO CONSTANTE.**

El régimen de filtración constante, se emplea entonces, cuando el precipitado esta constituido, total o parcialmente, por sustancias sensibles a la presión (compresibles) si no se emplea cantidad suficiente de ayuda-filtro. Trabajando en régimen de velocidad de flujo constante, se comienza a filtrar a pequeña presión y, a medida que va aumentando el espesor de la torta, y con ello la resistencia del filtro, se va elevando la presión para mantener constante el volumen de filtrado obtenido en iguales intervalos de tiempo. Este proceso tiene la desventaja de que precisamente en los primeros momentos, en que por ser pequeña la resistencia se podrían obtener

grande volúmenes de filtrado, no se aprovechan las condiciones que resultan de elevar la presión y, con ello, el rendimiento global del filtro.

La velocidad de flujo ( $q$ ) esta dada por

$$q = \frac{V}{\theta} \quad (\text{Ec. 1.45})$$

donde:

$V$  = Volumen.

$\theta$  = Tiempo.

Puesto que no hay variación en la velocidad de filtración, la ecuación general de filtración (Ec. 1.14) queda de la siguiente forma:

$$\frac{V}{\theta} = \frac{A (-\Delta P) \tau}{(K V + R_m) \mu} \quad (\text{Ec. 1.46})$$

despejando la caída de presión:

$$(-\Delta P) = \frac{V (K V \mu + R_m \mu)}{\theta A}$$

aplicando el valor de  $V = q_0 \theta$

$$(-\Delta P) = \frac{\mu K q_0^2}{A} + \frac{R_m \mu q_0}{A}$$

La caída de presión se puede expresar como

$$(-\Delta P) = A' q_0^2 \theta + C' q_0 \quad (\text{Ec. 1.47})$$

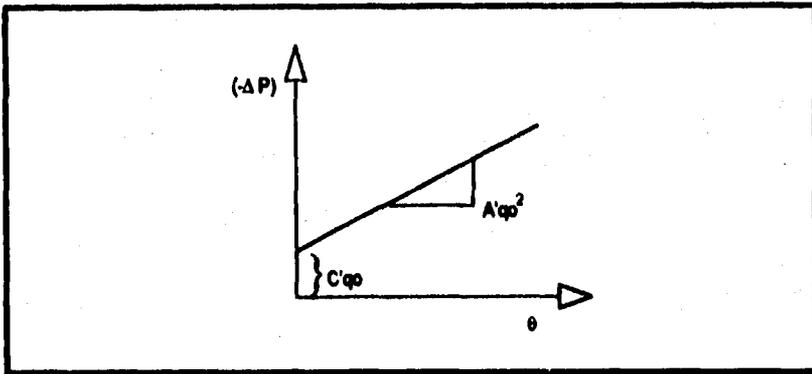
donde:

$$A' = \frac{\mu K}{A} = \frac{\mu \alpha C}{A^2} \quad (\text{Ec. 1.48})$$

$$C' = \frac{\mu R_m}{A} \quad (\text{Ec. 1.49})$$

La Ec. 1.47 representa a una línea recta (Fig. 16).

Fig. 16. GRÁFICA  $(-\Delta P)$  vs  $\theta$ , EN RÉGIMEN DE FILTRACIÓN A VELOCIDAD DE FLUJO CONSTANTE.



#### • LAVADO DE LA TORTA EN LA OPERACIÓN DE FILTRACIÓN.

El proceso de lavado en la operación de filtración, se efectúa a la presión con la cual se terminó la filtración, y al ya no haber depósito de sólidos se efectúa también a velocidad de flujo constante.

$$q_w = \frac{A (-\Delta P)_w}{(K V_f + R_m) \mu}$$

Despejando la caída de presión

$$(-\Delta P)_w = q_w \frac{(K V_f + R_m) \mu}{A}$$

$$(-\Delta P)_w = q_w \left( \frac{\mu \alpha C}{A^2} V_f + \frac{\mu R_m}{A} \right)$$

$$(-\Delta P)_w = (A' V_f + C') q_w$$

donde, A' y C' están dadas por las Ec. 1.48 y 1.49 respectivamente.

Sustituyendo  $q_w = \frac{V_w}{\theta_w}$  y despejando el tiempo, tenemos la siguiente ecuación:

$$\theta_w = \frac{V_w (A' V_f + C')}{(-\Delta P)_w} \quad \text{(Ec. 1.50)}$$

donde:

$\theta_w$  = tiempo de lavado de la torta.

$V_w$  = Volumen del fluido de lavado.

$V_f$  = Volumen de filtrado final.

$(-\Delta P)_w$  = Caída de presión en el lavado.

(18,38,58,59,60).

### **RÉGIMEN DE FILTRACIÓN MIXTO.**

Este régimen pretende armonizar las ventajas de los dos anteriores para dar solución a la filtración de partículas compresibles. Se comienza a velocidad de flujo constante, a poca presión, hasta que se ha formado un lecho suficiente sobre el medio filtrante; después, se eleva la presión hasta el límite oportuno y se procede a presión constante (velocidad decreciente).

Las ecuaciones, en este régimen se utilizan considerando los procesos por separado para caída de presión constante y velocidad de flujo constante.

(38,46).

### 1.4.4. ECUACIONES PARA FILTRACIÓN CONTINUA.

En el proceso de filtración continua la caída de presión es constante, por lo que, se usan las ecuaciones para filtración intermitente con pequeñas modificaciones.

El medio filtrante, para este caso, se supone entra limpio después de cada ciclo, por lo que, la resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ) se considera despreciable; quedando la ecuación general de filtración (Ec. 1.14) como:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A(-\Delta P)\tau}{K V \mu}$$
$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{K V \mu}{A(-\Delta P)\tau} \quad (\text{Ec. 1.51})$$

Integrando la ecuación anterior en los límites desde  $V = 0$  cuando  $\theta = 0$  hasta  $V = V_f$  cuando  $\theta = \theta_f$  queda:

$$\int_0^{\theta_f} d\theta = \frac{K \mu}{A(-\Delta P)\tau} \int_0^{V_f} V dV$$
$$\theta_f = \frac{K \mu}{A(-\Delta P)\tau} \frac{V_f^2}{2} \quad (\text{Ec. 1.52})$$

El tiempo de filtración es una fracción del tiempo del ciclo, por lo tanto:

$$\theta_f = f \theta_c \quad (\text{Ec. 1.53})$$

donde  $f$  = Fracción disponible para la formación de la torta y corresponde a la fracción sumergida del tambor.

Sustituyendo la Ec. 1.53 en la Ec. 1.52:

$$f \theta_c = \frac{K \mu}{A (-\Delta P) \tau} \frac{V_f^2}{2} = \frac{\mu \alpha C V_f^2}{A^2 (-\Delta P) \tau 2}$$

Despejando  $V_f/A$ :

$$\frac{V_f}{A} = \sqrt{\frac{2 (-\Delta P) \tau f \theta_c}{\mu \alpha C}}$$

Dividiendo entre el tiempo del ciclo:

$$\frac{V_f}{\theta_c A} = \left[ \frac{2 (-\Delta P) \tau f}{\mu \alpha C \theta_c} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.54})$$

$A$  = Área de filtración, y para obtener la capacidad del ciclo se requiere del área total.

Despejando el área de filtración de la Ec. 1.2:

$$A = f A_T \quad (\text{Ec. 1.55})$$

Aplicando en la Ec. 1.54, las Ec. 1.8 y 1.55:

$$\frac{V_f}{\theta_c A T} = \frac{\varphi}{360^\circ} \left[ \frac{2 (-\Delta P) T \frac{\varphi}{360^\circ}}{\mu \alpha C \theta_c} \right]^{1/2}$$

$$\text{Capacidad} = \frac{\varphi}{360^\circ} \left[ \frac{2 (-\Delta P) T \frac{\varphi}{360^\circ}}{\mu \alpha C \theta_c} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.54})$$

La ecuación anterior representa la capacidad del ciclo de filtración para un filtro continuo de tambor rotatorio al vacío.

(42,64).

**Capítulo 2**

**MÉTODOS DE ANÁLISIS**  
**EXPERIMENTAL**

## **2.1. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA TEORÍA DE FILTRACIÓN.**

En la filtración no es posible establecer las dimensiones de un filtro industrial o sus condiciones de operación, con la simple consideración de las características de las sustancias que en ella intervienen, sin pasar por una fase experimental, donde se realicen estudios de laboratorio o pruebas en plantas piloto para determinar las características de la suspensión y las condiciones óptimas de trabajo, de tal forma que los resultados del ensayo puedan extrapolarse y/o escalarse a un nivel industrial con un cierto margen de seguridad. (8,46,66).

Las ecuaciones de filtración son útiles en la predicción del efecto de un cambio en cualquier variable, siempre y cuando las constantes sean determinadas de datos tomados sobre la suspensión a filtrar, y así, poder ser empleadas para el escalamiento y/o extrapolación. (4,8,46).

### **2.1.1. FACTORES QUE AFECTAN LA FILTRACIÓN.**

En las ecuaciones de filtración intervienen varios factores, que dependiendo del tipo de suspensión que se este trabajando, tendrán diferentes efectos.

#### **EFFECTO DE LA PRESIÓN.**

En la filtración de sólidos granulares o cristalinos, un aumento en la presión provoca un incremento casi proporcional de la velocidad de flujo. Por otro lado, en los precipitados viscosos y floculentos, la velocidad de filtración aumenta solo ligeramente al aumentar la presión.

Algunos materiales tienen una presión crítica sobre la cual un aumento posterior ocasiona una disminución en la velocidad de flujo. En la filtración de ciertas mezclas no homogéneas, tales como aquellas que contienen sólidos viscosos, a las cuales se les ha agregado ayuda-filtro, se ha encontrado que una velocidad de flujo constante durante la filtración es más satisfactoria que una presión constante, puesto que la última da como resultado una claridad inicial baja del filtrado y una acumulación rápida de resistencia de la torta. En realidad, la filtración de todas las suspensiones exceptuando a las más incompresibles, es más satisfactoria cuando se usa una baja presión al comienzo de la operación. Esto resulta especialmente importante al filtrar suspensiones de bajo contenido de sólidos.<sup>(10,23,46)</sup> La mayoría de los filtros a presión utiliza bombas centrifugas que pueden manejar un régimen de filtración mixto como se explica en el capítulo 1.

## **EFFECTO DEL ESPESOR DE LA TORTA.**

El espesor de la torta es un factor importante para determinar la capacidad y el diseño de un filtro, además el ciclo de operación depende de ella. La teoría de filtración demuestra que, despreciando la resistencia específica del medio filtrante, la velocidad promedio de flujo durante una filtración es inversamente proporcional a la cantidad de torta depositada y al cuadrado del área de filtración.

El espesor de la torta permitido en un ciclo de filtración debe optimizarse, considerando la resistencia específica de la torta, la resistencia del medio filtrante, el tiempo requerido para remover la torta producida y preparar el medio para el siguiente ciclo. Por ejemplo, si la resistencia específica de la torta es muy elevada y ocasiona una resistencia de flujo excesiva con respecto a  $R_m$ , la máxima productividad del filtro se obtiene con una torta muy delgada; la cual implica, mayor dificultad en la descarga, mayor cantidad de ciclos de lavade, más mano de obra, etc.

## **EFFECTO DE LA VISCOSIDAD.**

La velocidad de filtración en cualquier momento es inversamente proporcional a la viscosidad del filtrado.

La alta viscosidad de algunos filtrados puede reducirse diluyendo , la suspensión inicial, a veces con una ganancia neta en la velocidad de filtración.

Si se requiere que el filtrado tenga una concentración elevada para tratamientos posteriores o por ser en si un producto, la dilución es factible si el costo de una reconcentración no ocasiona que la economía de la filtración sea poco favorable.

## **EFECTO DE LA TEMPERATURA.**

La viscosidad de la mayoría de los líquidos disminuye marcadamente al aumentar la temperatura. Así, al operar a una mayor temperatura se permiten velocidades de filtración más altas.

Las suspensiones que forman tortas compresibles son afectadas en su filtración de manera más complicada por los aumentos de temperatura, pero el efecto general se inclina a aumentar la velocidad de la misma. Los límites en que una suspensión puede ser calentada son fijados por el costo de calentamiento y, en filtraciones a vacío por la presión de vapor del filtrado.

## **EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.**

Pequeños cambios en el tamaño de partícula afectan al índice de compresibilidad de la torta y cambios mayores afectan inclusive, la resistencia específica de la torta.

La disminución en el tamaño de partícula ocasiona una menor velocidad de filtración y un mayor contenido de humedad en la torta, pero a veces una mayor eficiencia de lavado. Debido a ello, es importante controlar el tamaño de partícula en la alimentación del filtro.

La forma individual de cada partícula influye considerablemente sobre la permeabilidad y estructura de la torta.

## **EFFECTO DEL TIPO DE MEDIO FILTRANTE.**

**A**l seleccionar el medio para una filtración dada, debe hacerse un balance entre tener una malla muy abierta para reducir el taponamiento y una muy cerrada para evitar el escurrimiento de la torta. Una vez que se ha formado un pequeño espesor de torta, el efecto del medio filtrante es generalmente nulo, ya que el escurrimiento normalmente se detiene, y las partículas finas son atrapadas en la torta.

## **EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN LA SUSPENSIÓN.**

**E**xiste un efecto explícito en el sentido de que el tiempo necesario para depositar una determinada masa de sólidos es inverso a la cantidad de sólidos presentes en la suspensión.

Sin embargo, también puede haber efectos implícitos, donde el cambio en la concentración de la suspensión puede afectar a la velocidad de taponamiento del medio filtrante.

En diluciones extremas, los mismos sólidos que, cuando se depositan de suspensiones más concentradas, siguen la modalidad de filtración de torta, pueden pasar incluso a la modalidad de filtración superficial. Este efecto implícito favorece una mayor concentración en la suspensión a filtrar. Las partículas de una suspensión concentrada tienden a distribuirse uniformemente sobre la superficie del filtro, formando puentes. Como resultado, las suspensiones de alta concentración dan lugar a tortas de resistencia más pequeña que las formadas a partir de suspensiones diluidas.

(4, 10, 23, 46).

De lo anterior, la optimización del proceso se hace del balance de cuestiones técnicas y económicas que engloban todos los factores anteriores. Entonces, las variables más importantes de las cuales depende la velocidad de filtración son: la caída de presión en el sistema, el área de filtración, la viscosidad del filtrado, la resistencia específica de la torta y la del medio filtrante y las capas iniciales de la torta.

## **2.2. OBTENCIÓN DE DATOS A PEQUEÑA ESCALA.**

Para poder diseñar plantas a gran escala, es necesario predecir el efecto de las propiedades físicas tanto del fluido como del sólido, sobre las características de la filtración de una suspensión, implicando para ello el manejo de diversos lotes de suspensión y una gran gama de pruebas, las cuales significarían un gasto elevado de suspensión, tiempo y mano de obra, sumando a ello la necesidad de los cambios en las condiciones de operación. Debido a esto, se presenta la necesidad de que dichas pruebas, se efectúen a nivel laboratorio (pequeña escala) en equipos simples y pequeños.

Las características de la suspensión a filtrar, son muy sensibles a los métodos de preparación y manipulación; por ello, cuando se utilizan pruebas a pequeña escala para tener datos que aplicar a operaciones a gran escala es importante utilizar suspensiones idénticas, en todo lo posible, a las que se van a filtrar en los equipos industriales y utilizar métodos de preparación y manipulación similares a los métodos de gran escala. Tales precauciones son particularmente importantes cuando se manejan tortas compresibles y en alimentos son muy frecuentes.<sup>(6)</sup>

Las mismas sustancias químicas pueden tener permeabilidades ampliamente diferentes, dependiendo del proceso y del acondicionamiento. Las partículas varían su tamaño y forma con el tratamiento, envejecimiento y bombeo de las suspensiones.

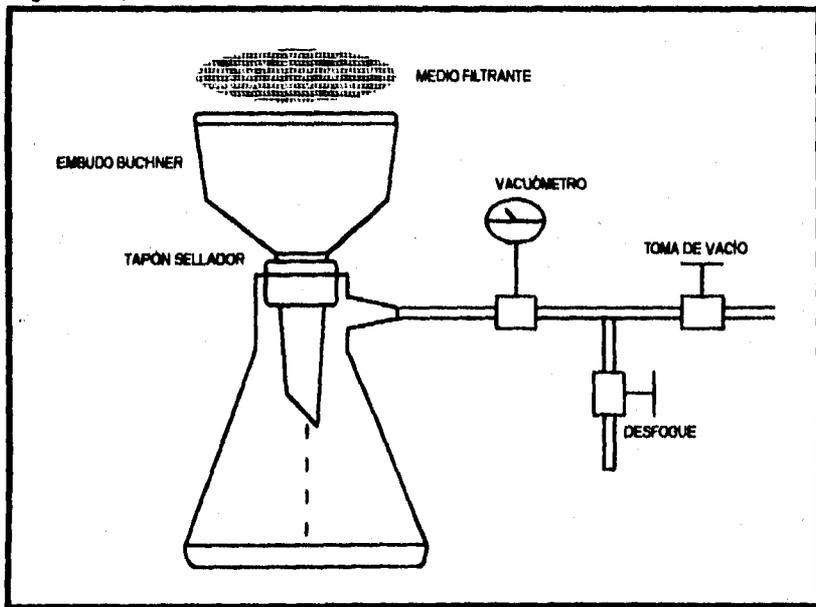
En las pruebas de laboratorio o de plantas piloto a pequeña escala, se deberá conocer de antemano si la filtración a efectuarse será a presión o a vacío, en caso contrario, se deberán efectuar estudios preliminares para saberlo. Ocasionalmente se efectúan pruebas completas a presión y a vacío para establecer comparaciones.

Las pruebas que se efectúan a pequeña escala, normalmente pasan por tres etapas. La primera etapa de pruebas se realiza en un embudo buchner, la segunda se efectúa en los equipos conocidos como celdas de filtración, y la tercera y última etapa es realizada en filtros piloto.

### 2.2.1. PRUEBAS EN EL EMBUDO BUCHNER.

La primera prueba que se debe efectuar en la evaluación de la operación de filtración, es cualitativa y, se realiza en un embudo buchner. Aquí, pueden hacerse experimentos con la finalidad, por ejemplo, de perfeccionar el grado de claridad requerido para el filtrado y la necesidad de utilizar ayuda-filtro (3a).

Fig. 17. ESQUEMA DEL MONTAJE PARA PRUEBAS EN EL EMBUDO BUCHNER.



Los embudos buchner, tienen en su interior una placa perforada fija sobre la que se apoya un trozo de medio filtrante, de modo que se minimicen las fugas en torno a él. Se tiene un colector del filtrado que para este caso es un matraz kitazato conectado al sistema de vacío (Fig. 17). El enlace entre el matraz y el embudo se efectúa por medio de tapones de goma. Entre el matraz y el sistema de vacío se coloca un vacuómetro para medir la presión (fuerza impulsora) y para controlarla se tiene una válvula de desfogue (24).

Para realizar las pruebas; con el vacío conectado, se vierte rápidamente en el embudo la suspensión en la cantidad predeterminada para producir una torta de espesor deseado. La suspensión se debe agregar de modo que no se seque durante la filtración, ni sufra daños mecánicos debidos a la cascada del líquido (46).

Los datos que se obtiene durante la filtración son tiempo y volumen de filtrado para una presión determinada; con lo que se puede observar la velocidad de filtrado. Si en la pruebas, la velocidad de filtración es relativamente buena, se puede proceder con las pruebas en la caída a vacío. En cambio, si la filtración procede lentamente, la prueba de vacío puede ser saltada y proceder a una prueba de presión cuantitativa (38).

Las pruebas en el embudo buchner, simulan el desempeño de los filtros continuos a vacío de superficie horizontal (bandas, mesas y bandejas). Por lo tanto, el tratamiento y análisis de los datos obtenidos en estas pruebas, no se puede realizar para el escalamiento al filtro prensa de placas y marcos o la extrapolación para el filtro de tambor rotatorio a vacío; pues en el caso del primero, no corresponde, principalmente, al tipo de fuerza impulsora manejada en el proceso (presiones por arriba de la atmosférica), y en el caso del segundo, a pesar de manejar el mismo tipo de fuerza impulsora, no simula su forma de operación.

De todo lo anterior, se puede decir que las pruebas en el embudo buchner son de mucha utilidad, para conocer de forma preliminar, el tipo de fuerza impulsora, la necesidad de ayuda-filtro y su forma de aplicación en el proceso, así también, tener una pauta para el planteamiento de las posteriores pruebas en equipos que simulan la operación de cualquiera de los dos filtros mencionados.

## **2.2.2. PRUEBAS EN CELDAS DE FILTRACIÓN.**

Las celdas de filtración son equipos relativamente simples y pequeños, que simulan el trabajo de un filtro a gran escala. Dichas celdas, permiten variar las mismas condiciones que se varían en un filtro industrial, por lo que, se puede observar la influencia del cambio en las variables sobre los parámetros del proceso (Capacidad, eficiencia o efectividad de separación, constantes de filtración o la velocidad misma de filtración). Debido a esto, las pruebas en celdas de filtración, comprenden una experimentación muy amplia, que depende de la motivación que lleve a realizar tales pruebas.

De acuerdo al tipo de fuerza impulsora con la que operan las celdas de filtración se dividen en:

- Celdas de presión y,
- Celdas de vacío.

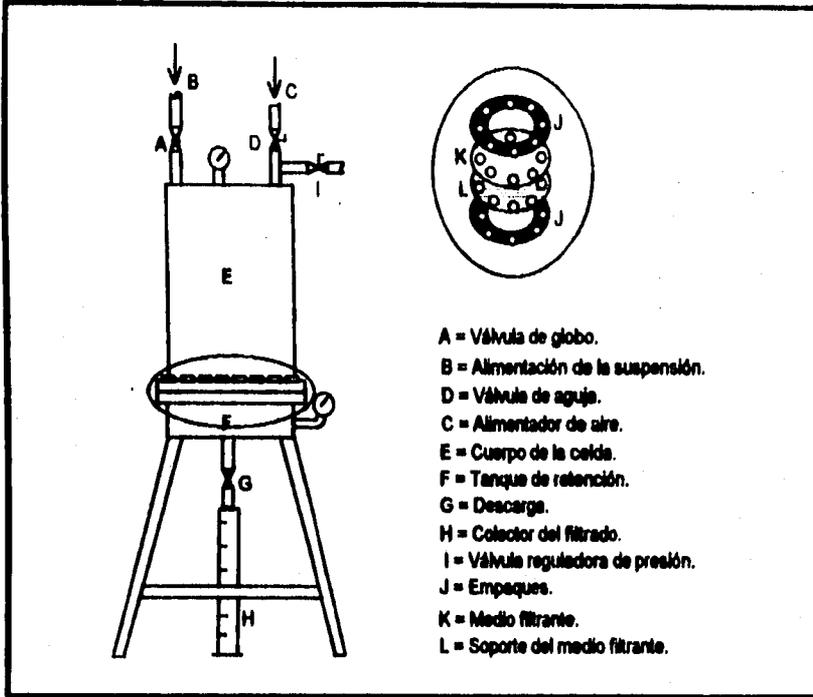
### **PRUEBAS EN CELDAS A PRESIÓN.**

Las celdas de presión deben permitir simular el proceso de separación de partículas del seno de un fluido, bajo una amplia gama de condiciones de operación como presión aguas arriba y aguas abajo (caída de presión total en el sistema,  $(-\Delta P)T$ ), espesor de los sólidos retenidos (torta de filtración), manejo de diversos lotes de suspensión y la aplicación de ayuda-filtros, en caso necesario, incluyendo el medio filtrante.

Los recipientes a presión generalmente son cilíndricos, por su fácil construcción y requerir menores espesores que otras formas geométricas para resistir una misma presión.

Todo recipiente cilíndrico está formado por el envoltorio, dispositivo de sujeción o apoyo del propio equipo conexiones por las que entran y salen los fluidos, elementos en el interior y accesorios en el exterior del recipiente.

Fig. 18. CELDA DE PRESIÓN.



En la figura 18, se muestra una celda de presión típica. La fuente de presión es un suministro de aire comprimido, tomado de un almacén de aire con una válvula reguladora. La presión requerida en la filtración se ajusta con el regulador, la suspensión es introducida a través de la válvula A, manteniendo la válvula D abierta. La válvula A es entonces cerrada y la D abierta, para admitir la entrada de aire y comenzar así la filtración. El volumen de filtrado es medido en el colector y los valores de volumen se obtienen a un tiempo progresivo. Es importante no permitir que el aire penetre a la torta, para evitarlo se detiene la prueba; cierra la válvula D simultáneamente abriendo A, permitiendo que el filtrado deje de fluir rápidamente, mientras que termina el proceso. Al término la base de la celda es movida, se separa y, se obtiene la torta para hacer sus determinaciones. Con el área del filtro, la

diferencia de presión y las propiedades de los componentes sólidos y líquido, se pueden conocer las constantes de filtración y todo lo que se estime conveniente (38).

Ruth (49), discutió esta forma de prueba en detalle, y demarco el método que a continuación se resume:

1. Una concentración uniforme de suspensión debe de ser mantenida durante el periodo de prueba.
2. Los aparatos deben ser contruidos para que el flujo de la suspensión y el filtrado sean completamente no restringidos en todo el tiempo que dure la prueba.
3. La agitación no debe ser vigorosa, ya que puede afectar mecánicamente a las partículas.
4. El filtrado deberá fluir libremente sin demora por el dispositivo.
5. La temperatura se debe mantener constante para no afectar la viscosidad de la suspensión.
6. Con el fin de evitar algunos efectos de sedimentación, el medio filtrante debe estar colocado en posición horizontal hasta el fondo de la cámara.

En las pruebas realizadas en las celdas de presión, se pueden tomar datos de incremento de tiempo y el volumen del filtrado durante el ciclo de formación de torta a la presión seleccionada, durante una corrida simple. Se debe tomar en cuenta el funcionamiento de la unidad comercial cuando se plantean los ciclos de prueba. El lavado, desplazamiento y el soplado de la torta con aire se pueden intentar en el caso en que sean apropiados. La descarga húmeda se puede simular abriendo la celda y proyectando un chorro de agua sobre la torta. La descarga en seco, al aplicar un chorro de aire al tubo de descarga del filtrado. Se deben efectuar pruebas a diversas presiones para determinar la compresibilidad de los sólidos de la torta.

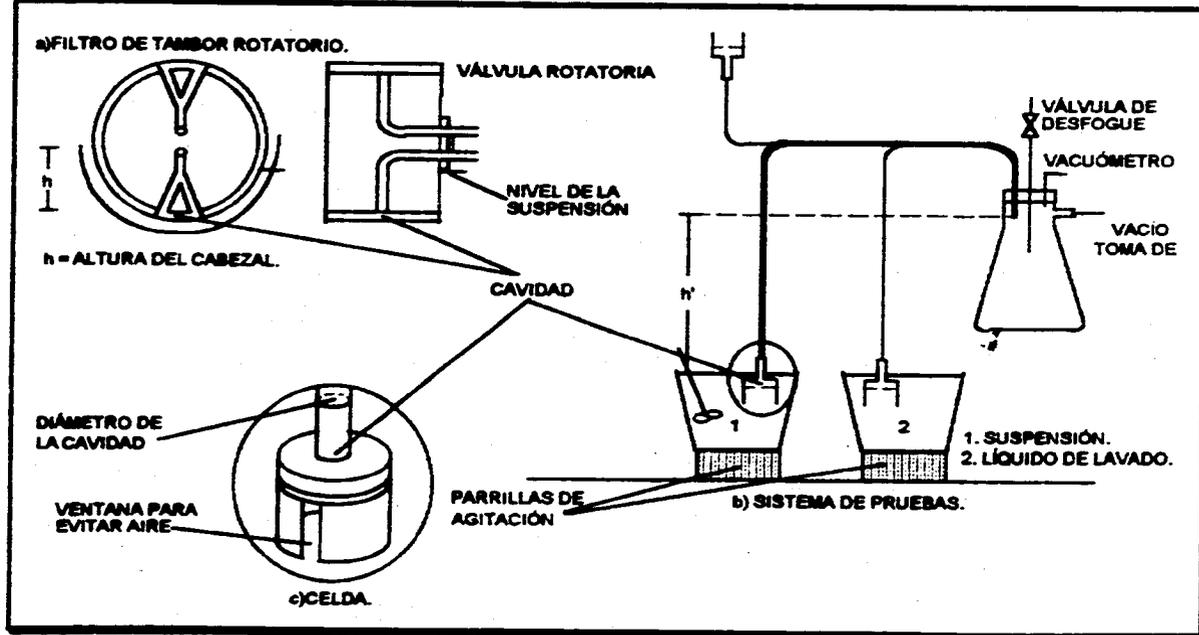
(26,38,63,66).

## **PRUEBAS EN CELDAS A VACÍO.**

Las pruebas en celdas de vacío se realizan para predecir el funcionamiento de los filtros de tambor rotatorio y, la celda de vacío se construye caracterizando o conociendo previamente el filtro de tambor rotatorio.

Las pruebas en celdas de vacío se conocen como pruebas de hojas y para realizarlas se monta un sistema como el que se muestra en la figura 19.

Fig. 19. ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRUBAS CON CELDAS DE VACÍO.



CHEAPE, D.W., 1962.

La celda de vacío (Fig. 18c) como tal, debe simular un sector o compartimento del tambor.

Las condiciones de experimentación se adecuan con el fin de mejorar el proceso o ciclo efectuado por el tambor, de esta manera la suspensión se coloca en un recipiente con agitación simple en función de prevenir la sedimentación. Mientras se está aplicando el vacío, la celda se desliza al interior del material que se va a filtrar y se mantiene totalmente sumergida en la suspensión, durante un periodo determinado que estará en función del ángulo de sumergencia y la velocidad de rotación, que se quiera simular del filtro de tambor rotatorio. Entonces, se retira la celda y se mantiene hacia arriba para simular el tiempo de desecación en el tambor que se permita. Con el vacío todavía conectado se puede sumergir en un tanque de agua u otro licor, si se espera el lavado y, a continuación se vuelve a desecar. La descarga se puede probar desconectando la celda y soplando por la tubería de drenaje y retirar con una espátula.

Durante las pruebas, los datos principales son volumen de filtrado, espesor, uniformidad y masa de la torta (húmeda y seca); a una velocidad de rotación y ángulo de sumergencia del tambor establecidos, para una presión dada.

En las pruebas de vacío se pueden hacer observaciones para evaluar la capacidad, velocidad de filtración, acondicionamiento de la suspensión, uso de ayudafiltros, etc. Pero la finalidad principal de las pruebas que se plantean es llegar a establecer el ciclo óptimo del filtro de tambor rotatorio.

(13,43,38).

Es importante construir las celdas de vacío y presión con un diámetro al menos de 6 pulgadas; con el fin de minimizar la fricción de las paredes y otros efectos de borde. Los resultados de aparatos de diámetro más pequeño pueden ser poco válidos.

## **2.2.3. PRUEBAS EN FILTROS PILOTO.**

La última etapa de las pruebas a pequeña escala son las que se realizan en los filtros piloto. Para tal efecto, los fabricantes deben proporcionarle al cliente una determinada renta de sus equipos piloto, para que realice sus pruebas en el sitio donde está localizada la planta (23).

La finalidad de las pruebas que se realizan en los equipos piloto son de comprobación, ya que la geometría de las celdas no es igual a la de los filtros a gran escala, además de que en estos equipos las pruebas requieren de una mayor cantidad de suspensión que las pruebas en celda.

(23).

## 2.3. FILTRACIÓN INTERMITENTE APLICADA UN FILTRO PRENSA DE PLACAS Y MARGOS.

Los métodos de análisis para determinar las constantes  $\alpha$  y  $R_m$  a partir de datos experimentales, en filtración intermitente, dependen del régimen de filtración que se este manejando (Caída de presión constante o velocidad de flujo constante).

### 2.3.1. ANÁLISIS DE DATOS PARA FILTRACIÓN A RÉGIMEN DE PRESIÓN CONSTANTE.

En el capítulo anterior, la ecuación 1.42 representa a una parábola con el vértice desplazado del origen de coordenadas ( $\theta = 0, V = 0$ ). La representación de  $V$  frente a  $\theta$ , para una filtración a presión constante es, por consiguiente, una rama de esta parábola.

Para evaluar las constantes  $\alpha$  y  $R_m$  para una caída de presión determinada, se necesitan datos experimentales de volumen con respecto al tiempo, a dicha presión. El tratamiento de tales datos se facilita partiendo de la ecuación general (Ec. 1.14), que se encuentra en forma diferencial y, puede expresarse como:

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{\mu \alpha C}{A^2 (-\Delta P)_T} V + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P)_T} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

La ecuación anterior es una derivada, que representa el límite de la razón del incremento de la ecuación 2.1 al incremento del volumen cuando este tiende a cero. Por lo tanto, de acuerdo a la definición de la derivada, cuando el  $\lim \Delta V \rightarrow 0$

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{\Delta\theta}{\Delta V}$$

Supóngase que se ha hecho un número de medidas de  $V$  frente a  $\theta$ . Entonces puede calcularse el cociente  $\Delta\theta/\Delta V$  para dos medidas sucesivas cualesquiera, siendo:

$\Delta\theta$  = incremento de tiempo entre dos observaciones.

$\Delta V$  = incremento de filtrado recolectado durante el periodo de tiempo  $\Delta\theta$ .

Puesto que, según la Ec. 2.1,  $d\theta/dV$  es una función lineal de  $V$ , un valor de  $\Delta\theta/\Delta V$  es la pendiente verdadera de la línea  $\theta$  frente a  $V$  en un punto  $(V_1+V_2)/2$ , que corresponde a la mitad de los valores medidos de  $V$  que definen  $\Delta V$ .

De lo anterior, la ecuación 2.1 puede expresarse como:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta V} = K_p \bar{V} + B \quad (\text{Ec. 2.2})$$

siendo:

$$K_p = \frac{\mu \alpha C}{A^2 (-\Delta P) \tau} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

y

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P) \tau} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Experimentalmente, con los valores obtenidos de  $\theta$  respecto a  $V$ , se puede realizar la siguiente tabulación de datos:

$V$	$\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta V$	$\Delta\theta/\Delta V$	$\nabla$
-----	----------	----------------	------------	-------------------------	----------

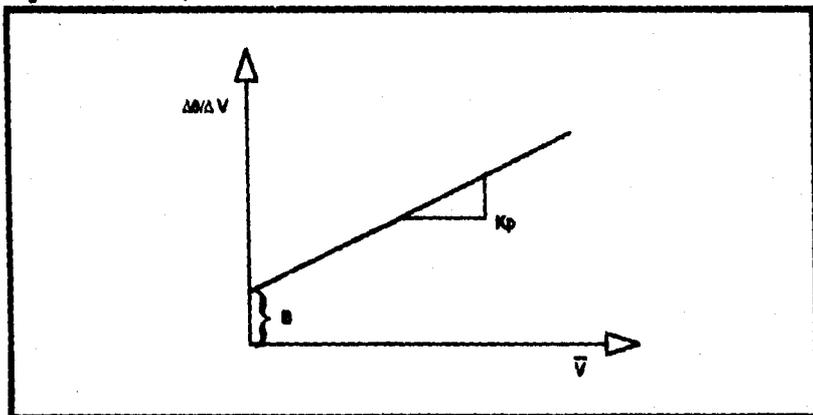
y con las dos últimas columnas construir una gráfica como se muestra en la Fig. 20, trazando la recta que pasa por estos puntos, y cuya pendiente:

$$m = K_p$$

y su ordenada al origen:

$$b = B$$

Fig. 20. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA Ec. 2.2.



Para conocer los valores de las constantes  $\alpha$  y  $R_m$ , como los valores de  $K_p$  y  $B$  son conocidos, se despejan de las ecuaciones 2.3 y 2.4 respectivamente.

Entonces, la ecuación para calcular la resistencia específica de la torta es a partir de datos experimentales es:

$$\alpha = \frac{K_p A^2 (-\Delta P) T}{\mu C} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

y para la resistencia del medio filtrante:

$$R_m = \frac{B A (-\Delta P) T}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

El método descrito, hasta aquí, para la obtención de las constantes de filtración ( $\alpha$  y  $R_m$ ) a partir de datos experimentales, se emplea cuando no existe una precapa de ayuda-filtro.

(3,6,8,19,39,44).

### **ANÁLISIS DE DATOS CUANDO SE UTILIZA AYUDA-FILTRO EN FORMA DE PRECAPA.**

Un problema común del uso de la ecuación 2.2 es obtener un valor negativo de  $R_m$ , esto ocurre cuando  $R_m$  es muy pequeño en comparación con  $\alpha$ .

Para evitar valores negativos de  $R_m$  la ecuación 1.42 puede ser usada en el análisis; si la filtración es llevada a cabo usando un filtrado sin sólidos en suspensión, es decir,

$$C = 0$$

La ecuación 1.42 queda como:

$$\theta t = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P) T} V_f \quad (\text{Ec. 2.7})$$

De la Ec. 1.32, la resistencia del medio filtrante esta dada por:

$$R_m = \frac{(-\Delta P)_m A}{\mu q} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Durante la filtración con solo el medio filtrante y la precapa, se puede decir que la caída de presión total en el sistema es:

$$(-\Delta P)_T = (-\Delta P)_m$$

Entonces, la ecuación 1.42 se puede expresar como:

$$\theta_f = \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P)_T} V_f^2 + \frac{1}{q} V_f \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$q$  es evaluada como la razón de flujo volumétrico sobre la precapa a la caída de presión usada en la filtración de la suspensión.

El valor de  $q$  se puede obtener realizando pruebas donde se haga fluir únicamente el filtrado a través de la precapa y el medio filtrante. Tomando valores de  $\theta$  frente a  $V$ , se puede construir una gráfica como se muestra en la Fig. 21, que representa la ecuación 2.7.

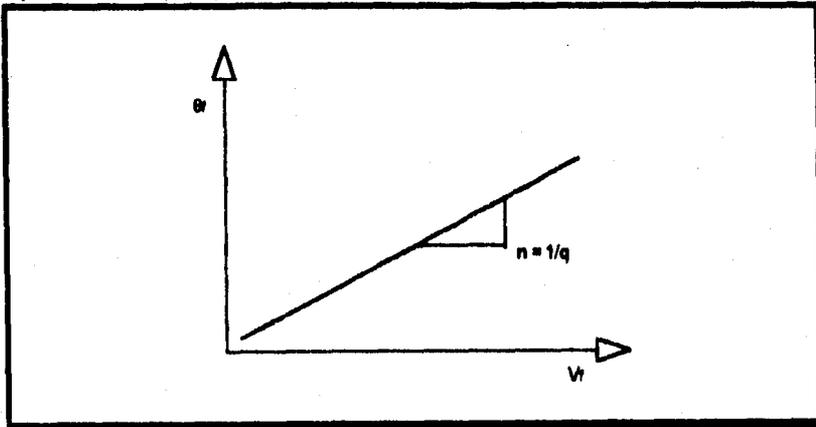
La pendiente ( $n$ ) en la gráfica es:

$$n = \frac{1}{q} = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta P)_T} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Para calcular el valor de  $q$  se tiene que:

$$q = \frac{1}{n} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Fig. 21. Gráfica de la ecuación 2.6, para obtener el valor de  $q$  y  $R_m$ , cuando se utiliza ayuda-filtro como precapa.



y el de  $R_m$  se calcula como:

$$R_m = \frac{n A (-\Delta P) T}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

o bien:

$$R_m = \frac{A (-\Delta P) T}{\mu q} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

La Ec. 2.9 se puede expresar como:

$$\left( \theta_r - \frac{V_f}{q} \right) = \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P) T} W^2 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

y para obtener el valor de  $\alpha$ , se deben obtener datos de  $\theta$  y  $V$ , en pruebas donde se filtra la suspensión usando la precapa y el medio filtrante.

La tabulación de los datos obtenidos se muestra a continuación:

$V$	$\theta$	$V/q$	$V^2$	$\theta - V/q$
-----	----------	-------	-------	----------------

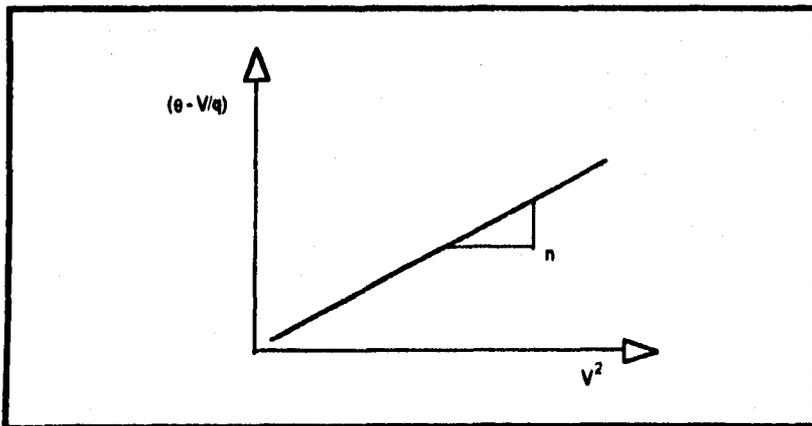
Con los valores de las dos últimas columnas se traza una gráfica como la de la figura 22, donde la pendiente:

$$n = \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P) T} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

y el valor de la resistencia específica de la torta está dado por:

$$\alpha = \frac{n 2 A^2 (-\Delta P) T}{\mu C} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

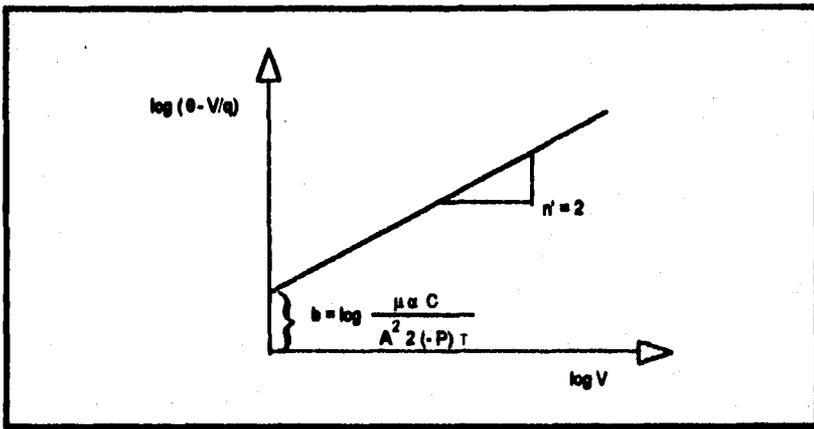
**Fig. 22. GRÁFICA DE LA ECUACIÓN 2.14, PARA OBTENER EL VALOR DE  $\alpha$ , CUANDO DE UTILIZA AYUDA FILTRO COMO PRECAPA.**



El valor de la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ), también se puede obtener aplicando logaritmos a la Ec. 2.14, que se expresa como:

$$\log \left( \theta t - \frac{Vt}{q} \right) = 2 \log Vt + \log \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P) \tau} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Fig. 23. GRÁFICA DE LA ECUACIÓN 2.17, PARA OBTENER EL VALOR DE  $\alpha$ , CUANDO SE UTILIZA AYUDA FILTRO COMO PRECAPA.



La Ec. 2.17 corresponde a una línea recta (ver Fig. 23), cuya pendiente es:

$$n' = 2$$

y la ordenada la origen:

$$b = \log \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P) \tau} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Si se grafican los valores de  $\left(\theta_f - \frac{V_f}{q}\right)$  frente al  $V_f$  en papel doble logarítmico tenemos que:

$$b = \frac{\mu \alpha C}{A^2 2 (-\Delta P) T}$$

y despejando el valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{b A^2 2 (-\Delta P) T}{\mu C} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

(38, 66)

### 2.3.2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COMPRESIBILIDAD DE LA TORTA (s).

De acuerdo a la teoría explicada en el capítulo anterior (Pág. 46-48); para obtener el índice de compresibilidad de la torta (s) se deben realizar corridas variando la caída de presión, y así obtener valores de  $\alpha$  frente  $(-\Delta P)$ .

El análisis de estos datos se realiza de acuerdo a la ecuación 1.44 para construir una gráfica como la que se muestra en la figure 15 y obtener el valor del índice de compresibilidad (s).

Lo importante de este análisis, es saber como o bajo que condiciones el material sólido de la suspensión tiende a cero, es decir, tiende a la incompresibilidad.

### 2.3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA FILTRACIÓN A RÉGIMEN DE VELOCIDAD DE FLUJO CONSTANTE.

En algunos casos, si se cuenta con la bomba adecuada, las corridas de filtración se llevan a cabo a velocidad de flujo constante; lo cual implica que la presión varía con respecto al tiempo.

La ecuación 1.47 es:

$$(-\Delta P) = A' q_0 \theta + C' q_0$$

Los datos obtenidos de las corridas a velocidad de flujo constante se tabulan de la siguiente forma:

$\theta$	$(-\Delta P)$
----------	---------------

Graficando la caída de presión con respecto al tiempo tenemos que la pendiente ( $n''$ ) es:

$$n'' = A' q_0^2 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

y la ordenada al origen:

$$b = C' q_0 \quad (\text{Ec. 2.21})$$

$q_0$  es la velocidad de flujo constante, por lo tanto, es un valor conocido.

Sustituyendo la Ec. 1.48 en la Ec. 2.20 :

$$n'' = \frac{\mu \alpha C q_0^2}{A^2}$$

y despejando el valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{n'' A^2}{\mu C q_0^2} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Sustituyendo la Ec. 1.49, en la Ec. 2.21, tenemos:

$$b = \frac{\mu R_m q_0}{A}$$

y despejando  $R_m$  queda:

$$R_m = \frac{b A}{\mu q_0} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

A través de la gráfica de la Fig. 15 y con las ecuaciones 2.22 y 2.23, se obtienen las constantes de filtración en régimen a velocidad de flujo constante.

#### 2.3.4. METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO.

El escalamiento consiste en llevar ciertas condiciones de una escala pequeña (laboratorio o planta piloto) a una escala más grande (nivel industrial).

La filtración es una operación donde se consigue la separación mecánica de sólidos contenidos en un fluido, por lo tanto, se halla sujeta a un régimen dinámico y los criterios de semejanza que involucra para escalar son: semejanza cinemática y dinámica (Ver Anexo 2), que corresponden a la igualdad en velocidades de flujo y presión ejercida sobre fluido respectivamente.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA 79

En la práctica, la teoría de modelos de suspensión no se aplica al escalamiento de experimentos de filtración debido a que la magnitud absoluta de las partículas sólidas y del fluido, así como sus formas geométricas, están determinadas por las condiciones del proceso, por lo cual, como ya se mencionó, en una experimentación de este tipo la suspensión a filtrar deberá poseer las mismas propiedades de filtración que a una escala mayor.

El único método directo para escalamiento de resultados experimentales, es a partir de un filtro a pequeña escala, que corresponda en semejanza mecánica al modelo a gran escala. Sin embargo, no debería existir dificultad teórica en el escalamiento de pruebas de filtración, en dimensiones directas de área, extrapolación a presiones mayores, o incremento en el espesor de la torta por medio de alguna de las ecuaciones empíricas de velocidad que existen, pero por experiencia, las velocidades industriales de filtración son menores, a aquellas que se pronosticaron con base a experimentos a pequeña escala, por lo cual es aconsejable permitir un margen de seguridad en la especificación del área de filtración, algunos autores recomiendan manejar un margen de seguridad del 30 al 50 %. (35).

### **ESCALAMIENTO DE DATOS PARA RÉGIMEN DE FILTRACIÓN A CAÍDA DE PRESIÓN CONSTANTE.**

Una vez obtenidos los valores de  $\alpha$  y  $R_m$ , por cualquiera de los métodos de análisis descritos en la sección anterior, se pueden obtener los valores de  $K_p$  y  $B$ , a partir de las Ec. 2.2 o 2.3 y 2.4. Estas constantes se ven afectadas tanto por la presión, como del área de filtración con que se trabajan.

Si, se conoce el trabajo del equipo al que se va escalar, es decir, se conocen los rangos de presiones y las áreas que se pueden manejar, por ejemplo, en el filtro piloto; para seguir manejando los mismos valores de las constantes se puede fijar una de estas dos variables y calcular al valor de la otra.

Para obtener estos valores a partir de los datos experimentales, se propone la siguiente secuencia de cálculo:

Conociendo los valores de  $\alpha$  y  $R_m$ , se pueden calcular las constantes  $K_p$  y  $B$  por medio de las Ec. 2.3 y 2.4. También se pueden obtener a través de la gráfica de la Ec. 2.2 (Fig. 20).

Como las constantes  $K_p$  y  $B$ , se ven afectadas por el área de filtración y la caída de presión que se manejaron en la experimentación, se puede hacer una modificación eliminando los valores de estas variables y sustituir los de las nuevas condiciones para el filtro a escalar, obteniendo unas nuevas constantes:  $K_p'$  y  $B'$ .

Entonces para calcular  $K_p'$  a través del valor de  $K_p$  se tiene la siguiente expresión:

$$K_p' = K_p \left( \frac{A_1^2 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2^2 (-\Delta P)_{T_2}} \right) \quad (\text{Ec. 2.24})$$

donde:

$A_1$  = Área de filtración en la celda.

$A_2$  = Área de filtración en el filtro prensa.

$(-\Delta P)_{T_1}$  = Caída de presión total en la celda.

$(-\Delta P)_{T_2}$  = Caída de presión total en el filtro prensa.

y para calcular  $B'$  a través de  $B$ :

$$B' = B \left( \frac{A_1 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2 (-\Delta P)_{T_2}} \right) \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Sustituyendo los valores de  $K_p'$  y  $B'$  en la Ec. 1.42:

$$\theta_f = \frac{K_p}{2} \left( \frac{A_1^2 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2^2 (-\Delta P)_{T_2}} \right) V_f^2 + B \left( \frac{A_1 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2 (-\Delta P)_{T_2}} \right) V_f \quad (\text{Ec. 2.26})$$

De la ecuación 2.26, se parte para el escalamiento. Si fijamos el área para trabajar en las nuevas condiciones, podemos calcular la caída de presión a través de la siguiente ecuación:

$$(-\Delta P)_{T_2} = \left[ \frac{\frac{K_p}{2} \left( \frac{A_1^2 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2^2} \right) V_f^2 + B \left( \frac{A_1 (-\Delta P)_{T_1}}{A_2} \right) V_f}{\theta_f} \right] \quad (\text{Ec. 2.27})$$

o bien, si se fija el valor de la caída de presión podemos calcular de la nueva área de filtración; despejando el área de la ecuación 2.26:

$$\theta_f = \frac{K_1}{A_2^2} + \frac{K_2}{A_2} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

donde:

$$K_1 = \frac{K_p A_1^2 (-\Delta P)_{T_1} V_f^2}{(-\Delta P)_{T_2}} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

y

$$K_2 = \frac{B A_1 (-\Delta P)_{T_1} V_f}{(-\Delta P)_{T_2}} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Multiplicando la Ec. 2.28 por el  $A_2^2$  y ordenando queda:

$$\theta_f A_2^2 - K_2 A_2 - K_1 = 0 \quad (\text{Ec. 2.31})$$

La ecuación anterior corresponde a una de segundo grado, por lo cual se puede resolver y encontrar el valor de la nueva área.

También, se puede sustituir el valor de  $K_p'$  en la Ec. 2.14:

$$\left( \theta_f - \frac{V_f}{q} \right) = \left( \frac{K_p A_1^2 (-\Delta P)_{T_1}}{2 A_2^2 (-\Delta P)_{T_2}} \right) V_f^2 \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Despejando el valor de la nueva área:

$$A_2 = \left[ \frac{K_p A_1^2 (-\Delta P)_{T_1} V_f^2}{2 (-\Delta P)_{T_2} \left( \theta_f - \frac{V_f}{q} \right)} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

y para la caída de presión:

$$(-\Delta P)_{T_2} = \frac{K_p A_1^2 (-\Delta P)_{T_1} V_f^2}{2 A_2^2 \left( \theta_f - \frac{V_f}{q} \right)} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Las ecuaciones 2.33 y 2.34, sirven también para realizar el escalamiento a un filtro piloto o industrial.

## 2.4. FILTRACIÓN CONTINUA APLICADA A UN FILTRO ROTATORIO.

El análisis de los datos obtenidos en las celdas a vacío y en los filtros piloto de tambor rotatorio, tiene la finalidad de establecer el ciclo óptimo de trabajo de estos filtros y para ello se establece una metodología de extrapolación.

### 2.4.1. METODOLOGÍA DE EXTRAPOLACIÓN PARA DETERMINAR EL CICLO OPTIMO DEL FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO.

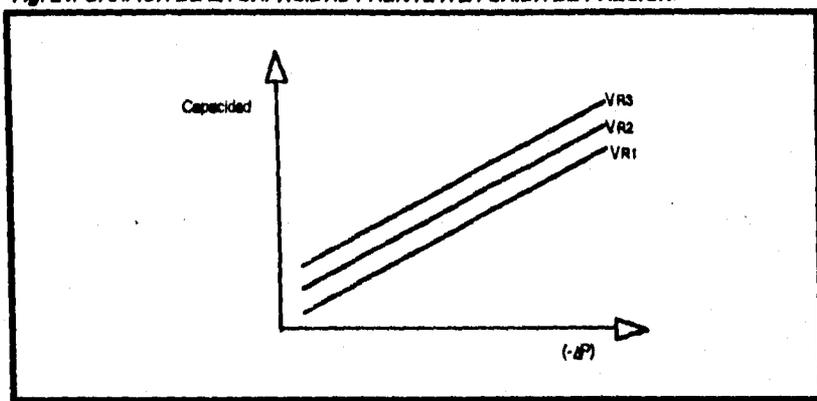
Las variables que se pueden manejar en un filtro de tambor rotatorio son: la caída de presión ( $-\Delta P$ ), el ángulo de sumergencia del tambor ( $\phi$ ), y la velocidad de rotación del tambor  $V_R$ .

La primera tabulación de datos que se tiene que hacer se realiza como se muestra en la siguiente tabla para cada caída de presión manejada:

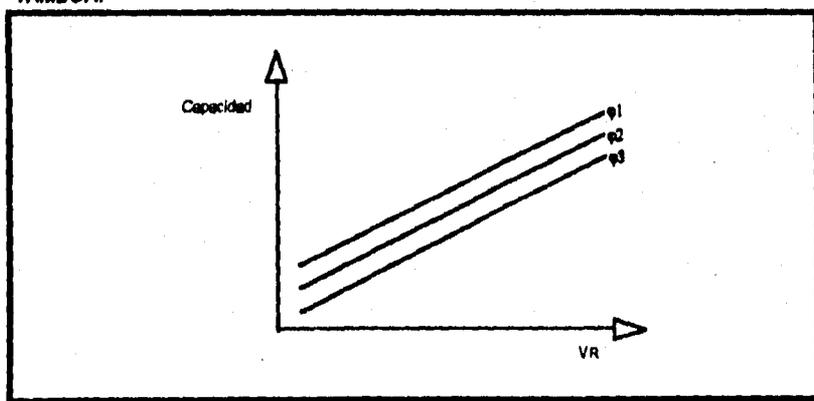
Velocidad de rotación	Ángulo de sumergencia	Tiempo de Inmersión de la celda	Volumen de filtrado recolectado	Capacidad del ciclo
$V_{R1}$	$\phi_1$			
	$\phi_2$			
	$\phi_3$			
$V_{R2}$	$\phi_1$			
	$\phi_2$			
	$\phi_3$			
$V_{R3}$	$\phi_1$			
	$\phi_2$			
	$\phi_3$			

La capacidad se calcula con la Ec. 1.7. y se construyen gráficas de la capacidad frente a la caída de presión, la velocidad de rotación del tambor y el ángulo de emergencia; como se muestra en las Fig. 24, 25 y 26 respectivamente.

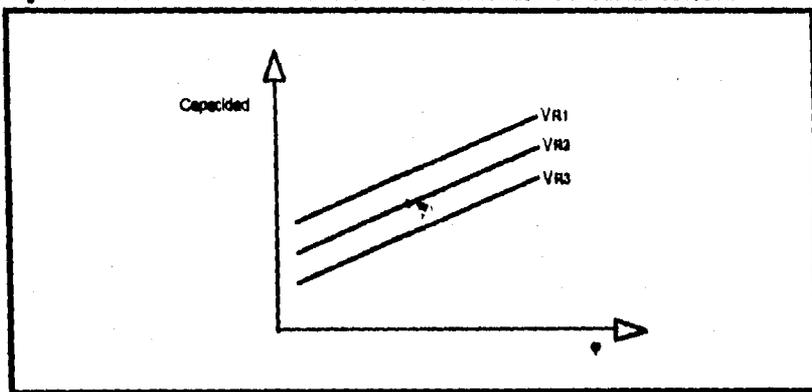
**Fig. 24. GRÁFICA DE LA CAPACIDAD FRENTE A LA CAÍDA DE PRESIÓN.**



**Fig. 25. GRÁFICA DE LA CAPACIDAD FRENTE A LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL TAMBOR.**



**Fig. 26. GRÁFICA DE LA CAPACIDAD FRENTE AL ÁNGULO DE SUMERGENCIA.**



Las gráficas anteriores se construyen tanto para la celda como para el filtro de tambor rotatorio y, se realiza una comparación para ver si tienen el mismo comportamiento; si uno es la continuación del otro, etc. Todo ello con la finalidad de establecer las mejores condiciones de trabajo del filtro para la suspensión en cuestión.

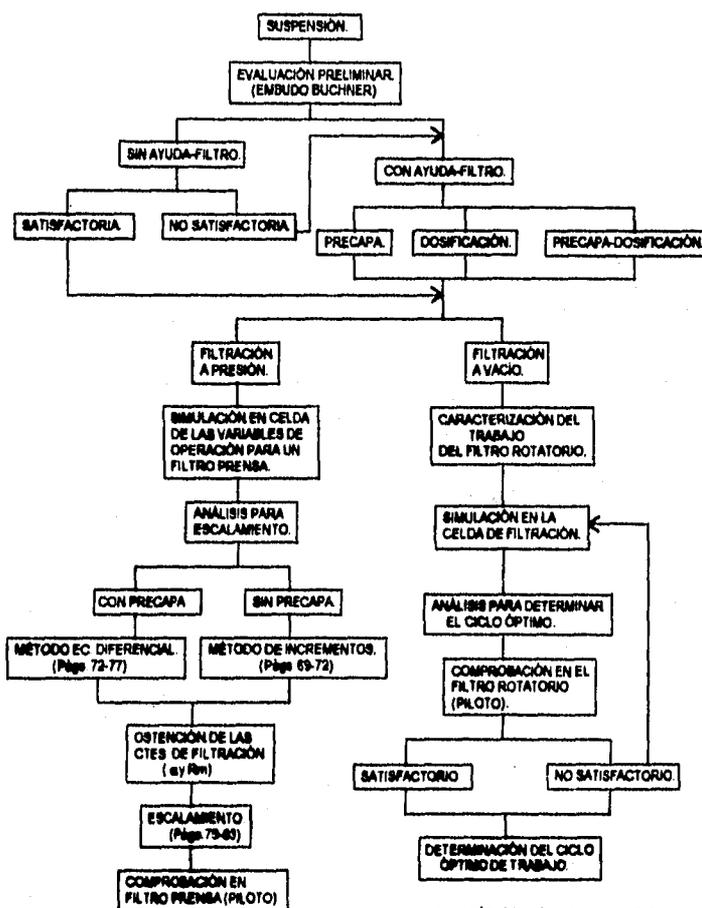
También se deben tomar en cuenta el uso de ayudafiltro y su forma de aplicación, para seleccionar el ciclo óptimo.

Es importante, mencionar que la determinación del ciclo óptimo del filtro de tambor rotatorio, puede complicarse debido a un mal diseño o funcionamiento de la celda de vacío.

(13).

## CONCLUSIONES.

En base al trabajo realizado se presenta el siguiente diagrama de decisión para la solución de un problema de filtración cuando el objetivo de la separación es obtener el filtrado.



\* LAS PÁG. CORRESPONDEN AL TEXTO

**El método de los incrementos, presenta la ventaja de ser un tratamiento más corto y se requieren de menos experimentos en comparación con el método de la ecuación diferencial integrada. Pero únicamente se aplica cuando se filtra la suspensión sola o con ayuda-filtro en forma de dosificación.**

**El método de la ecuación diferencial integrada, se utiliza cuando se aplica ayuda-filtro en forma de precapa, independientemente, de que se utilice en forma de dosificación. Este método, requiere de más experimentos, debido a las pruebas que se realizan para el cálculo de flujo volumétrico, donde no se filtra la suspensión.**

**Para finalizar, podemos decir que, en este trabajo se presentan las bases teóricas iniciales, para que los alumnos, en la asignatura de LEM - III - Alimentos, puedan comenzar a resolver un proyecto de filtración. Sin embargo, deben realizar una investigación más profunda en lo que correspondería al diseño y construcción de las celdas de filtración, para obtener resultados más satisfactorios en su trabajo.**

**NOMENCLATURA,**

**ANEXOS**

**Y**

**BIBLIOGRAFÍA.**

## NOMENCLATURA.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES EN EL S.I.
A	Área de filtración. En el caso del filtro de tambor rotatorio: Área disponible para la filtración en el tambor.	m <sup>2</sup>
A'	Constante de la ecuación de filtración a velocidad de flujo constante, definida por la Ec. 1.50.	Pa·s/m <sup>6</sup>
A <sub>T</sub>	Área total de filtración.	m <sup>2</sup>
A <sub>1</sub>	Área de filtración en la celda.	m <sup>2</sup>
A <sub>2</sub>	Área de filtración en el filtro prensa.	m <sup>2</sup>
a <sub>v</sub>	Superficie específica de las partículas.	m <sup>-1</sup>
B	Constante de la ecuación de filtración a caída de presión constante, definida por la Ec. 2.2.	s/m <sup>3</sup>
C	Masa de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado.	kg/m <sup>3</sup>
C'	Constante de la ecuación de filtración a velocidad de flujo constante, definida por la Ec. 1.50.	Pa·s/m <sup>3</sup>
d	Distancia desde el centro del tambor a la superficie líquida.	m
D <sub>c</sub>	Diámetro del capilar.	m
D <sub>t</sub>	Diámetro del tambor.	m <sup>2</sup>
f	Fración sumergida del tambor.	Adimensional
g	Aceleración de la gravedad.	9.81 m/s <sup>2</sup>
k	Constante de permeabilidad.	m <sup>4</sup>
K	Constante en la Ecuación General de Filtración, donde se encuentra implícita la resistencia específica de la torta.	m <sup>-4</sup>
K <sub>p</sub>	Constante de la ecuación de filtración a caída de presión constante, definida por la ecuación 2.2.	s/m <sup>6</sup>
L	Espesor de la torta.	m
L <sub>c</sub>	Longitud del capilar.	m

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES EN EL S. I.
$L_m$	Espesor hipotético de torta.	m
$L_t$	Espesor del tambor	m
$L_1$	Largo interior del marco.	m
$L_2$	Ancho interior del marco.	m
$m$	Masa de sólidos.	Kg
$m_a$	Masa de sólidos acumulados en el filtro.	Kg
$m_f$	Masa del filtrado.	Kg
$m_s$	Masa de la suspensión.	Kg
$m_o$	Relación masa de torta húmeda a torta seca.	Adimensional
$n$	Pendiente en la Ec. 2.7.	—
$n'$	Pendiente en la Ec. 2.17.	—
$n''$	Pendiente en la Ec. 1.47.	—
$N_p$	Número de partículas en el empaçado.	Adimensional
$P_a$	Presión aguas arriba (en la superficie de la torta).	$N/m^2 = Pa$
$P_b$	Presión en la superficie del medio filtrante.	$N/m^2 = Pa$
$P'$	Presión a la salida del medio filtrante.	$N/m^2 = Pa$
$q$	Flujo volumétrico o velocidad de flujo.	$m^3/s$
$q_p$	Velocidad de flujo.	$m^3/s$
$q_w$	Velocidad del fluido de lavado.	$m^3/s$
$R$	Radio del tambor.	m
$R_h$	Radio Hidráulico.	m
$R_m$	Resistencia del medio filtrante	$m^{-1}$
$s$	Fraccción masa de sólidos en la suspensión.	Adimensional
$s$	Índice de compresibilidad de la torta.	Adimensional
$S$	Arco sumergido del Tambor.	m
$S_p$	Área superficial o superficie de las partículas.	$m^2$
$v$	Velocidad de flujo.	$m^3/s$
$v_f$	Velocidad de filtración.	$m^3/s$
$V$	Volumen de filtrado o volumen de filtrado inicial.	$m^3$
$V_f$	Volumen de filtrado total obtenido o volumen de filtrado final.	$m^3$
$V_m$	Volumen hipotético de filtrado expresado en términos de la resistencia que presenta un espesor hipotético de torta.	$m^3$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES EN EL S.I.
$V_p$	Volumen de las partículas.	$m^3$
$V_w$	Volumen del fluido de lavado.	$m^3$
#Marcos	Número de marcos.	Adimensional
$\alpha$	Resistencia específica de la torta.	$m/Kg$
$\alpha_0$	Resistencia al inicio del depósito de sólidos.	$m/kg$
$\alpha_1$	Resistencia específica de la torta puntual.	$m/kg$
$\Delta V$	Incremento de filtrado recolectado durante el periodo de tiempo $\Delta\theta$ .	$m^3$
$\Delta\theta$	Incremento de tiempo entre dos observaciones.	s
$(-\Delta P)_c$	Caída de presión a través de la torta.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_f$	Perdida de carga debida a la fricción.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_m$	Caída de presión en el medio filtrante.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_T$	Caída de presión total en el sistema.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_w$	Caída de presión en el lavado.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_{T1}$	Caída de presión total en la celda.	$N/m^2 = Pa$
$(-\Delta P)_{T2}$	Caída de presión total en el filtro prensa.	$N/m^2 = Pa$
$\varphi$	Ángulo de sumergencia del tambor.	Adimensional
$\mu$	Viscosidad del fluido o filtrado.	$Pa.s$
$\theta$	Tiempo o tiempo de filtrado inicial.	s
$\theta_c$	Tiempo total del ciclo de filtración.	s
$\theta_d$	Tiempo de descarga.	s
$\theta_f$	Tiempo de filtrado o tiempo de filtrado final.	s
$\theta_s$	Tiempo de secado.	s
$\theta_d$	Tiempo de descarga.	s
$\rho$	Densidad del filtrado.	$Kg/m^3$
$\rho_p$	Densidad de las partículas.	$Kg/m^3$
$\xi$	Porosidad de la torta.	Adimensional

## **ANEXO 1. MEDIOS FILTRANTES Y AYUDAFILTROS.**

### **MEDIOS FILTRANTES.**

La superficie o membrana sobre la cual se depositan los sólidos se llama medio filtrante y la función principal del medio filtrante es actuar como soporte para promover la formación de una torta de sólidos y conservarla una vez formada.

El medio filtrante debe cumplir con ciertos requisitos para su utilización en el proceso de filtración y se presentan a continuación:

- El medio debe retener los sólidos sin obstruir sus poros con facilidad.
- Debe ofrecer la mínima resistencia al flujo preciso para la formación rápida de una torta y retener su fortaleza bajo las condiciones extremas que se presentan durante la operación (presión de trabajo).
- Las características de su superficie deben ser tales que faciliten la extracción de la torta con limpieza.
- Ser no-tóxico y compatible químicamente con los productos que se filtren.
- Capacidad para conformarse mecánicamente al tipo de filtro con el cual se utilizará.
- No debe ser excesivamente caro.

Los medios filtrantes se pueden clasificar en: rígidos o flexibles; a continuación se exponen los más comunes.



La mayoría de los medios filtrantes pueden obtenerse con tamaño de poro específico para satisfacer las aplicaciones de filtración particulares de que se trate.

(8,15,19,31,36,37,39,45,46).

### AYUDA-FILTROS.

El empleo de ayuda-filtros es una técnica que se aplica con frecuencia para las filtraciones en que surgen problemas de baja velocidad de filtración, obstrucción rápida del medio o claridad no satisfactoria del filtrado. Los ayuda-filtros son sólidos granulares o fibrosos capaces de formar una torta de alta permeabilidad en la que se pueden retener los flocúlos deformables y los sólidos muy finos y pastosos. El empleo de los ayuda-filtros permite utilizar un medio filtrante mucho más permeable que el requerido para la clarificación, con objeto de producir un filtrado de la misma calidad por filtración profunda.

Los materiales utilizados como ayuda-filtros deben cumplir con ciertas características como:

- Ser de baja densidad global, para minimizar su tendencia al asentamiento y ayudar a la buena distribución sobre la superficie de un medio filtrante que no sea horizontal.

- Ser químicamente inertes e insolubles en el líquido a ser filtrado.

- Deben formar una torta incompresible, rígida y permeable.

- Remover sólidos, aún los más finos a altas velocidades de flujo.

Existen varios materiales que cumplen con las características anteriores, los cuales son seleccionados de acuerdo a las cualidades del líquido a filtrar. En alimentos el ayudafiltro más utilizado son las tierras de diatomeas o diatomaceae.

### **TIERRAS DE DIATOMEAS.**

Las tierras de diatomeas son los esqueletos de plantas acuáticas unicelulares llamadas diatomeas. Su estructura es porosa y compuesta principalmente por sílice. Sus restos fósiles se encuentran abundantemente en los terrenos llamados aluviales, es decir, constituidos por materiales acarreados por ríos, o en suelos de mares y lagos.

### **MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL AYUDA-FILTRO.**

La aplicación o uso de los ayudafiltros tiene algunas variantes, que dependen primero de sus características propias, del costo y del rendimiento, y de las condiciones de operación y la suspensión que se pretende filtrar.

Sin embargo, independientemente de esto, el ayudafiltro se puede aplicar en forma de precapa o dosificación.

#### **1. Precapa.**

La precapa es una cantidad fija de ayudafiltro expresada en masa por unidad de área filtrante. Dicha cantidad se emplea para formar una capa delgada de ayudafiltro sobre el medio filtrante, el espesor que adquiere depende de su densidad volumétrica.

Para la formación de la precapa se emplea líquido limpio, filtrado, sin impurezas. Por ejemplo, la suspensión de ayudafiltro se puede preparar con agua limpia, en un tanque aparte.

Las finalidades de la precapa son:

- Evitar que el medio filtrante se obstruya con impurezas con lo que se prolonga su duración considerablemente.
- Proporcionar claridad inmediata.
- Facilitar la limpieza del medio filtrante al finalizar el ciclo.

La formación de la precapa se realiza haciendo circular una suspensión de tierras de diatomeas y de líquido filtrado o clarificado entre el filtro y el tanque de precapa. Debido a que la mayor parte de las partículas, son más pequeñas que las aberturas en el medio filtrante, estas deben formar la precapa haciendo un puente sobre las mismas. Estos puentes pueden ser destruidos por burbujas de aire, cambios bruscos en la presión o vibraciones, haciendo que el líquido filtrado se enturbie hasta que se corrijen estos defectos. Si la distribución de la precapa en el filtro es buena puede llenarse este con líquido limpio y luego se puede bombear o inyectar la suspensión concentrada de ayudafiltro en el filtro seguido por la recirculación.

#### **Cantidad de precapa.**

Las cantidades correctas para la formación de la precapa deben ser de 10 a 15 lbs. por cada 100 ft<sup>2</sup> de área del filtro, (5 a 7 Kg. por cada 10 m<sup>2</sup> de área) se usan mayores cantidades cuando la distribución de flujo dentro del filtro es mala, o cuando se van a poner en marcha nuevos filtros. Si la distribución es correcta, 10 libras de ayudafiltro por 100 pies cuadrados de área de filtro formarán una precapa de aproximadamente 1/16" de espesor.

La concentración de suspensión para la precapa dependerá principalmente de la relación área volumen de filtro y de tubería. Sin embargo, las suspensiones fluctuarán entre 0.3% y 0.6%. Si son inferiores al 0.3% puede resultar difícil la formación de la precapa ya que la formación del puenteo depende en gran parte del efecto de "aglomeración" de las partículas de las tierras de diatomeas que tratan de pasar a través de las aberturas del medio filtrante.

#### **2. Dosificación.**

La dosificación es aquella cantidad de ayudafiltro necesaria para proporcionar y mantener la permeabilidad de la torta filtrante. La dosificación se agrega desde para hacer posible la filtración, hasta para simplemente aumentar el rendimiento de un

equipo en su ciclo de filtración pasando por el hecho de también poder mejorar la calidad del filtrado.

La finalidad de la dosificación es mantener la permeabilidad de la torta filtrante, proporcionando un flujo y calidad de filtrado adecuados.

La dosificación del ayudafiltro debe hacerse en forma seca o en suspensión. En forma seca quiere decir, que se agrega directamente a la suspensión que se quiere filtrar, descargándole directamente al tanque que contiene la suspensión.

La dosificación en suspensión, se refiere a que la adición del ayudafiltro se hace inyectando desde un tanque donde se ha preparado la suspensión de ayudafiltro, hasta la línea principal de alimentación al filtro.

#### **Cantidad de dosificación.**

La cantidad de ayudafiltro que se emplea en dosificación, depende principalmente de la cantidad de sólidos presentes que interesa remover de la suspensión en cuestión.

Por lo tanto es importante que primero se determine la cantidad de sólidos en la suspensión a filtrar.

Una vez que se tiene la relación del porcentaje de sólidos no disueltos presentes, entonces se puede calcular la cantidad de ayudafiltro necesario para lograr una buena separación. Así pues, la dosificación de ayudafiltro se expresa con relación a los sólidos presentes en la suspensión; por ejemplo, si tenemos un líquido cuyo contenido de sólidos es de aproximadamente 1% en peso, podemos empezar a probar dosificando una cantidad igual pero de ayudafiltro, es decir otro 1%, lo que nos daría una relación de dosificación

1:1

**Ayudafiltro : Sólidos.**

Conociendo el contenido de sólidos cada vez antes de filtrar, es posible mejorar aún más el uso del ayudafiltro.

(5,20,27,28,34,35,43,45,46).

## **ANEXO 2 CRITERIOS DE SEMEJANZA.**

La metodología de escalamiento en los procesos químicos, se lleva a cabo utilizando criterios, que se basan en el análisis adimensional o de las ecuaciones más relevantes del proceso manejado; se plantea el principio de semejanza, que se ocupa de las relaciones entre sistemas físicos de diferentes tamaños.

Los estados de semejanza aplicables al proceso de filtración son:

### 1) Semejanza Geométrica.

Dos sistemas son geoméricamente semejantes cuando para cada punto en uno de ellos existe un punto correspondiente en el otro.

### 2) Semejanza Mecánica.

Comprende tres tipos de semejanza: la estática, la cinemática y la dinámica.

a) semejanza estática. Dos sistemas geoméricamente semejantes, son estáticamente semejantes, cuando al ser expuestos a esfuerzos constantes, sus deformaciones relativas, son tales que conservan su semejanza geométrica.

b) Semejanza Cinemática. Se ocupa de sistemas sólidos o fluidos en movimiento. Introduce una dimensión igual al tiempo.

"Dos sistemas geoméricamente semejantes en movimiento son cinemáticamente semejantes, cuando partículas correspondientes, describen trayectorias geoméricamente semejantes en intervalos correspondientes de tiempo".

La semejanza cinemática es de especial interés para la ingeniería química; pues si, dos sistemas que operan con fluidos son geométrica y cinemáticamente semejantes, entonces los patrones de flujo son geoméricamente semejantes y por lo tanto las velocidades de transferencia de masa y de calor de los dos sistemas mantendrán una relación simple una con respecto a otra.

c) Semejanza Dinámica. Se encarga del estudio de las fuerzas que aceleran o retardan masas en movimiento en sistemas dinámicos.

En sistemas que operan con fluidos o sistemas compuestos por partículas sólidas discretas, la semejanza cinemática incluye a la semejanza dinámica ya que el movimiento de la masa es función de las fuerzas aplicadas sobre ellas.

"Dos sistemas geoméricamente semejantes que están en movimiento son dinámicamente semejantes cuando las razones de todas las fuerzas correspondientes son iguales".

Existen otros dos criterios, los cuales, para el escalamiento de filtros no son aplicables y son:

### 3) Semejanza Térmica.

Se ocupa de sistemas en los cuales ocurre flujo de calor e introduce a otra dimensión, la temperatura.

"Dos sistemas geoméricamente semejantes son térmicamente semejantes cuando la diferencia de temperaturas correspondientes mantienen una relación constante".

### 4) Semejanza Química.

Se ocupa de sistemas reactivos en los cuales la composición química en los sistemas sean las mismas solo debe haber una relación fija entre las concentraciones de las especies químicas que se desean comparar.

"Sistemas geométrica y térmicamente semejantes, son químicamente semejantes, cuando las diferencias de concentración correspondientes mantienen una razón constante de uno a otro, y si los sistemas están en movimiento son cinemáticamente semejantes".

## BIBLIOGRAFÍA.

1. APELLANIZ de la Puente, Javier, Criterios de Selección y Operación de un Sistema Clarificador de Jugo de Manzana por Filtración. México: 1985. Ingeniería en Alimento. UNAM-FESC.
2. ARCINIEGA García, Daniel. Consideraciones Técnicas en Filtración. México: 1988. Ingeniería Química. UNAM-Facultad de Química.
3. BADGER, Walter L. y BANCHERO, Julius T.; Introducción a la Ingeniería Química, México: Mc Graw Hill, 1989.
4. BARROSO Castillo, José, Diseño de un Sistema de Filtración de Cianuro y Zinc. México: 1983, Ingeniería Química, UNAM-Facultad de Química.
5. BASSO, A. J., Vacuum filtration using filteraids, Chemical Engineering, abril 19, 1982, pp. 159-162.
6. BENNETT, C.O. y MYERS, J.E., Momentum, Heat and Mass Transfer, 3a. ed, Singapore: Mc Graw Hill, 1985.
7. BERNAL Ortega, J. Antonio y ROHER Ramírez, A. Determinación Experimental de Constantes de Filtración. México: 1984, Ingeniería Química. UNAM-Facultad de Química.
8. BRENNAN, J. G., et al., Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos, 2a. ed., España: Acribla, 1980.
9. BROWN, George G., Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, España: Marín S. A., 1981.
10. COULSON, J. M. y RICHARSON, J. F., Ingeniería Química, 3ra. ed. España: Reverté S. A., 1981.
11. Columbia Filter Co. de México S.A. de C.V., Documento técnico: Equipo de Proceso Diseñado para Filtración de Líquidos. 1986.
12. CHARM, Stanley E., The Fundamentals of Food Engineering, 3ra. ed., USA: AVI, Publishing Company, Inc., 1980.
13. CHEAPE, Dudley W., Jr., Leaf tests can establish optimum rotary-vacuum-filter operation. Chemical Engineering, Vol. 84, Nos. 11-15, Junio 14, 1982. pp. 141-148.

14. CHOUHURY, A. P. R. y DAHLSTROM, D. A., Prediction of Cake-washing Results with Continuous Filtration Equipment, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 3, No. 4, diciembre 1957, pp. 433-438.
15. Depto. Técnico de Pall España, S. A., Tecnología de la filtración, Ingeniería Química, España: Junio 1991, pp. 193-204.
16. DURCHHOLZ, R. F., Controlled-Pressure Filtration, Chemical Engineering, Enero 31, 1966, pp. 77-82.
17. EARLE, R.L., Ingeniería de los Alimentos, 2a. ed., España: Acribia S.A., 1988.
18. Filtration & Separation, A Chemical Engineering Special Advertising Section, Chemical Engineering, Agosto 5, 1985, pp. 44-94.
19. GEANKOPLIS, Christie J., Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, México: CECSA, 1993.
20. GODOY VILLAFUENTE, Martín. La Filtración y las Tierras Diatomáceas. México: 1989. UNAM.
21. GRACE, H. P. Resistance and compressibility of filter Cakes, Part I, Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 6, Junio 1953, pp. 303-317.
22. GRACE, H. P. Resistance and compressibility of filter Cakes, Part II: Under conditions of pressure filtration, Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 7, Julio 1953, pp. 367-377.
23. GUTIERREZ Cortés, Elsa. Establecimiento y Validación de la Metodología de Escalamiento para Equipos de Filtración Intermitente (Diseño, Construcción y Prueba de una Ceida a Presión). México: 1996. Ingeniería en Alimentos. UNAM-FESC.
24. HELMAN, J., Farmacotecnia Teoría y Práctica, Tomo III, España: CECSA, 1981.
25. HSING C., N., Liquid-solid filtration: generalized design and optimization equations, Chemical Engineering, Julio 31, 1978, pp. 97-101.
26. HUGOT, E., Manual Para Ingenieros Azucareros, México: C. C. E. S.A., 1982.
27. HULL, William Q., KENNEY, John, Jr. y GAMSON, Bernard W., Diatomaceous Earth, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 45, No. 2, Febrero 1953, pp. 258-269.
28. Johns Manville Mexicana, S.A. de C.V. Documento técnico: Como el Celite Ayuda a la Filtración. 1980.
29. JOHNSTON, Peter R., Liquid filtration, Chemical Engineering Progress, Noviembre 1988, pp. 18-26.

30. JOHNSTONE and THRING, Pilot Plants and Scale-up Methods Models. USA: Mc Graw Hill, 1957.
31. KOVACS, Jules P., A new guide to... Filter Media, Chemical Engineering, Vol. 67, Junio 13, 1960, pp. 209-212.
32. KRIEGEL, Phillip, Plate and frame filter press, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 30, No. 11, Noviembre 1938, pp. 1211-1213.
33. LO, Francis y OAKES, Donald, Leap from Pilot-to Full-scale Production, Chemical Engineering, Noviembre 1993, pp. 110-114.
34. LONA Tavares, Antonio Y MACOUZET Ocampo, Victor. Estudio para absorber un aumento en la producción sin alterar las instalaciones actuales en el área de filtración de una planta cervecera. México: 1973. Ing. Quím. UNAM-Facultad de Química.
35. LUNA González, Enrique. Optimización de las condiciones de operación para la clarificación y decoloración de jarabe a 60 °Bx. Elaboración con azúcar estandar. México: 1995. Ingeniería en Alimentos. UNAM-FESC.
36. MANS, J., How to select a membrane filtration system, Dairy Foods, Mayo 1994, pp. 65.
37. MARECEK, J., Filter Cloth Plugging and Its Effect on the Filter Performance, Industrial and Engineering Processes design and development, 1981, pp. 693-698.
38. MATTESON, Michael J. y ORR, Clyde, Filtration Principles and Practices, 2a. ed., USA: Marcel Dekker, Inc., 1987.
39. Mc CABE, Warren L. y SMITH, Julian C., Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Volumen II, España: Reverté S.A., 1981
40. MOIR, Douglas N., Selecting batch pressure filters, Chemical Engineering, Vol. 89, Julio 26, 1982, pp. 47-57.
41. MOLINA Ubeda, Rafael, Técnicas de Filtración en la Industria Enológica, España: A. Madrid Vicente Ediciones:, 1994.
42. NELSON, P. A. y DAHLSTROM, D. A., Moisture-content correlation of Rotary Vacuum Filter Cakes, Chemical Engineering Progress, Vol. 53, No. 7, Julio 1957, pp. 320-327
43. NEU, E. L., KOBATA, H. T. y LEPPLA, P. W., Precoat scale-up from lab-size filter test leaf, Chemical Engineering Progress, Vol. 54, No. 6, Junio 1958, pp. 65-68.
44. OCCON-TOJO, Problemas de Ingeniería Química, Operaciones Básicas, Tomo II, España: Aguilar, 1979.

45. ORR, Clyde, Filtration Principles and Practices, Part I, USA: Marcel Dekker, Inc., 1977.
46. PERRY, R. H., GREEN, D.W. y MALONEY, J.O., Perry Manual del Ingeniero Químico, 6a. ed (3ra. en español), México: Mc Graw Hill, 1992.
47. RUTH, B. F., MONTILLON, G. H. y MONTONNA, R. E., Studies in filtration. I Critical analysis of filtration theory, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 25, No. 1, Enero, 1933, pp. 76-82.
48. RUTH, B. F., MONTILLON, G. H. y MONTONNA, R. E., Studies in filtration. II Fundamental axion of constant-pressure filtration, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 25, No. 2, Febrero, 1933, pp. 153-161.
49. RUTH, B. F., Studies in filtration. IV Nature of fluid flow through filter septa an its importance in the filtration equation, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27, No. 7, Julio, 1935, pp. 806-816.
50. RUTH, B. F., Correlating filtration theory with industrial practice, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 38, No. 4, Junio 1946, pp. 564-571.
51. SAVAL, Susana y BLANCAS, Abel, Escalamiento de procesos biotecnológicos, Biotecnología Industrial, Vol. 11, No. 154, Julio de 1989, pp. 48-51.
52. SEIFERT, J. A. Y BOWERSOX, J. P., Getting the most out of thickeners and clarifiers, Part 3, Chemical Engineering, Agosto 1990, pp. 80-83.
53. SHARBAUGH, J.C., Practical Filtration Formulas, Chemical Engineering, Vol. 69, No. 65, Diciembre 10, 1962, pp. 153-158.
54. SILVERTBLATT, C. E., RISBUD, H. y TILLER, F. M., Batch, Continuous Processes for Cake Filtration, Chemical Engineering, Abril 29, 1974, pp. 127-136.
55. SMITH, G. R. S., How to use rotary, vacuum, precoat filters, Chemical Engineering, Febrero 16, 1976, pp. 84-90.
56. SPERRY, D. R., Analysis of filtration data, Industrial and Engineering Chemistry, Vol 36, No. 4, Abril 1944, pp. 323-328.
57. SVAROVSKY, L., Filtration and allied operations, Chemical Engineering, Julio 2, 1979, Pp. 63-76.
58. TILLER, F. M., The role of porosity in filtration, Part 1, Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's Law, Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 9., Septiembre 1953, pp. 467-479.
59. TILLER, F. M., The role of porosity in filtration, Part 2, Analytical Ecuations for constant rate filtration, Chemical Engineering Progress, Vol. 41, No. 6., Junio 1955, pp. 282-290.

60. TILLER, F. M., The role of porosity in filtration, Part 3, Variable-pressure-variable-rate filtration, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 4, No. 2., Junio 1958, pp. 170-174.
61. TILLER, F. M., y COOPER, H., The role of porosity in filtration, Part V. Porosity variation in filter cakes, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 8, No. 4, Septiembre 1962, pp. 445-449.
62. TILLER, F. M., y SHIRATO, M., The role of porosity in filtration: VI. New Definition of Filtration Resistance, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 10, No. 1, Enero 1964, pp. 61-67.
63. TILLER, F. M., HAYNES, S. y WEI-MING LU, The role of porosity in filtration VII. effect of Side-Wall friction in compression-permeability cells, AIChE Journal, Vol. 18, No. 1., Enero, 1972, pp. 13-20.
64. TILLER, F. M. Y CRUMP, J. R., How to increase filtration rates in continuous filters, Chemical Engineering, Junio 1977, pp. 183-187.
65. TOLEDO, Romeo T., Fundamentals of Food Process Engineering, 2a. ed., USA: AVI, 1991.
66. VIAN, Angel y OCON, Joaquín, Elementos de Ingeniería Química Operaciones Básicas, 2a. ed., España Aguilar, 1979.
67. WHITE, G. E. y HYMAN, S. C., Constant rate filtration scaleup, Chemical Engineering. Vol. 67, Junio 13, 1960, pp. 219-220.
68. WU, Yanxiang, An Analysis of Constant-Pressure Filtration, Chemical Engineering Science, Vol. 49, No. 6, 1994, pp. 831-836.