



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

ESTABLECIMIENTO Y VALIDACION DE LA  
METODOLOGIA DE ESCALAMIENTO PARA  
EQUIPOS DE FILTRACION INTERMITENTE.  
( DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE UNA  
CELDA A PRESION ).

EL INFORME DE SERVICIO SOCIAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A :  
ELSA GUTIERREZ CORTEZ

ASESOR: ING. FERNANDO BERISTAIN

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

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.



INSTITUTO NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-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 el trabajo El Servicio Social Titulación ; Establecimiento y validación de la metodología de escalamiento para equipos de filtración intermitente, Diseño, construcción y prueba de una celda a presión,

que presenta la pasante: Elsa Gutiérrez Cortez  
con número de cuenta: 8754220-4 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera en Alimentos .

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido 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"  
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Mex., a 10 de agosto de 1995

PRESIDENTE	<u>I.Q. Alvaro Leo Ramirez</u>	
VOCAL	<u>I.B.Q. Fernando Beristain</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Ediltrudis Estrada Lucas</u>	
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Laura M. Cortazar Figueroa</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.C. Mg. Elena Quiroz Macias</u>	

## **DEDICATORIA**

**Debemos tener fe en nuestros propios esfuerzos y en nuestro animo para perseverar, en nuestras intenciones, preocúpate por dar lo mejor que tengas, sin importar lo reducido o vasto que sea.**

**Al Ing. Fernando Beristain :**

**Por sus importantes aportaciones al  
dirigir mi trabajo.**

**Al Ing. Alvaro Leo**

**:**

**Por su colaboración en la construcción  
del equipo.**

**Al Ing. F. Gómez**

**:**

**Por su estimulo y oportunidad.**

**A MI ESPOSO : Por su apoyo y su amor en todos  
los momentos difíciles.**

**A MIS HIJOS : Por sus manifestaciones de  
cariño siempre.**

**Aquellos que de alguna manera me dieron la  
oportunidad de ser lo que soy ;  
A LA UNIVERSIDAD, A MIS PROFESORES ,  
A MIS AMIGOS.**

**A TODOS ELLOS**

**GRACIAS.**

## **REPORTE FINAL DEL SERVICIO SOCIAL DE TITULACIÓN**

**M.V.Z. Rogelio Barroso Ramos**  
jefe del departamento de servicio social.  
**FES-C UNAM**  
**PRESENTE .-**

**Nombre : Elsa Gutiérrez Cortés**  
**Carrera : Ing. en Alimentos**  
**No. de cta : 8754220-4**  
**Nombre del programa : Diseño, construcción y validación de un equipo de filtración intermitente (celda a presión)**  
**Periodo de realización : 8 meses**  
**Nombre del responsable : Ing. Fernando Beristain.**  
**prof. Asociado "c" T.C.**  
**Lugar de realización : Nave 2000, LEM III**  
**Campo 4, UNAM.**

**ESTABLECIMIENTO Y VALIDACIÓN DE  
LA METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO  
PARA EQUIPOS DE FILTRACIÓN  
INTERMITENTE.  
(DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA  
DE UNA CELDA A PRESIÓN  
CONSTANTE).**

## INDICE

PORTADA	Pg.
<b>ETAPA I (BIBLIOGRÁFICA)</b>	
Introducción	2
Objetivos	3
Marco teórico referencial (cuadro metodológico)	5
Descripción de actividades (cronograma - calendario)	7
Nomenclatura	8
Generalidades de filtración	10
Teoría de la filtración	12
Compresibilidad de la torta	16
Clasificación de los equipos de filtración	20
Filtración intermitente	23
Factores que afectan la filtración	25
Sistema prueba de filtración a presión	29
Criterios de escalamiento	31
Métodos de validación	34
<b>ETAPA II (DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN)</b>	
Diseño de la celda	37
Construcción del sistema	41
<b>ETAPA III (VALIDACIÓN DEL SISTEMA)</b>	
Desarrollo experimental	46
Manual de operación y condiciones de operación	49
Resultados de la validación del sistema	51



## INDICE

### ETAPA IV (ESCALAMIENTO A NIVEL PLANTA PILOTO)

Caracterización y manual de operación del filtro prensa	68
Escalamiento (resolución numérica)	71
Desarrollo experimental	76
Resultados de la experimentación en el filtro prensa	78
Comprobación del escalamiento	80
Conclusiones finales	82
Recomendaciones y sugerencias	83
BIBLIOGRAFÍA	84

## **PROBLEMA**

Planteamiento de la metodología de escalamiento de datos experimentales obtenidos a nivel laboratorio para realizar un escalamiento a nivel piloto en la operación de separación mecánica de suspensiones sólido-fluido por medio del proceso de filtración intermitente a presión constante.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseño, construcción y validación de un sistema de prueba para el proceso de filtración intermitente a presión constante, para la obtención de datos experimentales que permitan por medio de los criterios de escalamiento definir las condiciones de operación para un filtro prensa a nivel planta piloto.

## **HIPÓTESIS**

Si las constantes obtenidas en dos sistemas de filtración intermitente (sistema de prueba tipo celda y filtro prensa) se relacionan en términos de similitud geométrica principalmente, manteniendo constante la concentración de la suspensión y la magnitud de las fuerzas (presión), entonces dichos sistemas serán escalables.

**ETAPA I**

**INVESTIGACIÓN**

**BIBLIOGRAFICA**

## INTRODUCCION

La filtración es la operación de separación mecánica de partículas sólidas de una suspensión en un fluido mediante la utilización de un medio poroso, el cual retiene los sólidos y permite el paso del líquido.(9)

Para la filtración en gran escala, si bien resulta posible predecir de forma cualitativa el efecto de las propiedades físicas del fluido y del sólido sobre las características de la filtración de una suspensión, es necesario en todos los casos llevar a cabo pruebas preliminares antes de poder diseñar plantas a una escala mayor, ya que estas pruebas reducirán en gran medida costos globales, en base a ello se propone el diseño, construcción y validación de equipo que realice dichas pruebas.(28)

El pensar en un sistema prueba de filtración intermitente, en base al cual se pueda más adelante realizar diseños a nivel industrial, es debido a su simplicidad y versatilidad, pudiendo ser utilizado para una amplia gama de materiales a diversas condiciones de operación tal como espesor de la torta y presión; con un costo de mantenimiento bajo; en el cual se obtengan fácilmente elevadas presiones y resulte igualmente adecuado tanto si el producto principal es la torta como el líquido.(2)

La implementación de este tipo de sistemas de pruebas a nivel laboratorio resulta imprescindible debido a que dependiendo de la motivación de la investigación pueden estar encaminadas a estudios sobre escalamiento o extrapolación de datos para establecer, condiciones de operación como puede ser la velocidad de filtración, la capacidad de proceso, etc. Dichas pruebas, conllevan en primer lugar, al manejo de diversos lotes de suspensión y una gama de pruebas que, de no poderse efectuar en el laboratorio, significarían un gasto enorme de suspensión, tiempo y mano de obra, sumándose la necesidad de los cambios de operación, lo cual a nivel industrial, no es posible llevar a cabo. De acuerdo a esto, se presenta la necesidad de que las pruebas indispensables para este tipo de trabajo se puedan efectuar a nivel laboratorio con equipos sencillos por lo cual en este trabajo se diseño una celda de filtración que puede cumplir con estos requerimientos.(20),(2)

**Objetivos Académicos, social y general del programa :**

**Objetivo Académico :** Diseño, construcción y validación de equipo didáctico para el mejor desarrollo de los proyectos experimentales que se realizan en el LEM III Alimentos.

**Objetivo Social :** Desarrollo del material y construcción de equipo didáctico para su utilización en el LEM-III Alimentos, lo que traerá como consecuencia un mejor desarrollo del trabajo experimental en el LEM y como resultado un aumento en la eficiencia de el proceso de enseñanza aprendizaje.

**Objetivo general del programa :** Construcción de equipo didáctico a través del planteamiento de un diseño teórico que este de acuerdo a las necesidades de aplicación y utilización en los planteamientos experimentales de los proyectos que se plantean en el LEM-III Alimentos.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Objetivo Particular 1 :

Diseñar, construir y caracterizar un sistema de prueba de filtración intermitente a nivel laboratorio.

#### Obj. 1.1

Diseñar un sistema de prueba de filtración intermitente a nivel laboratorio en base a conocimientos bibliográficos.

#### Obj. 1.2

Construir un sistema de prueba de filtración intermitente a nivel laboratorio.

### Objetivo particular 2 :

Validar el sistema construido a nivel laboratorio.

#### Obj. 2.1

Caracterizar física y experimentalmente el sistema prueba.

#### Obj. 2.2

Determinar la influencia de la presión y espesor de la torta sobre la velocidad de filtración en el sistema de prueba (celda a presión).

#### Obj. 2.3

Obtener los valores de las constantes de filtración ( $\alpha$ ,  $R_m$ ,  $S$ ) del sistema de prueba.

### Objetivo particular 3 :

Realizar el escalamiento de los datos obtenidos en el sistema de prueba (nivel laboratorio) al filtro prensa (nivel piloto).

#### Obj. 3.1

Caracterizar el filtro prensa.

#### Obj. 3.2

Obtener las constantes de filtración ( $\alpha$ ,  $R_m$ ,  $S$ ) en el filtro prensa, en base a condiciones de escalamiento establecidos en el sistema de prueba.

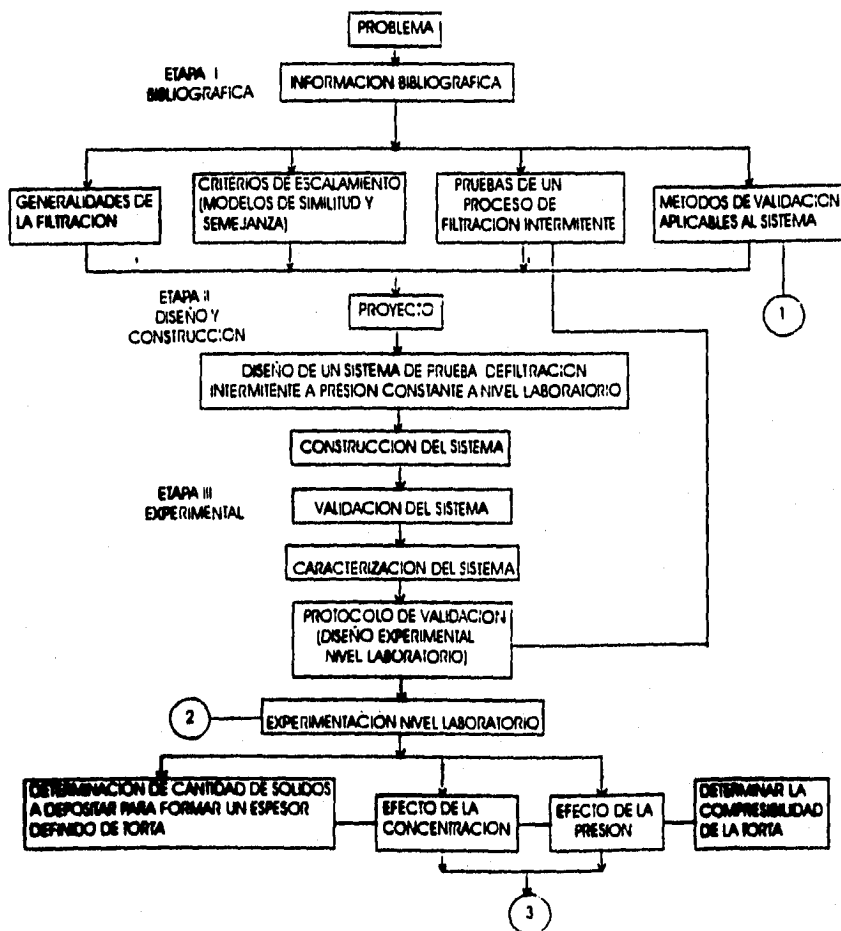
#### Obj. 3.3

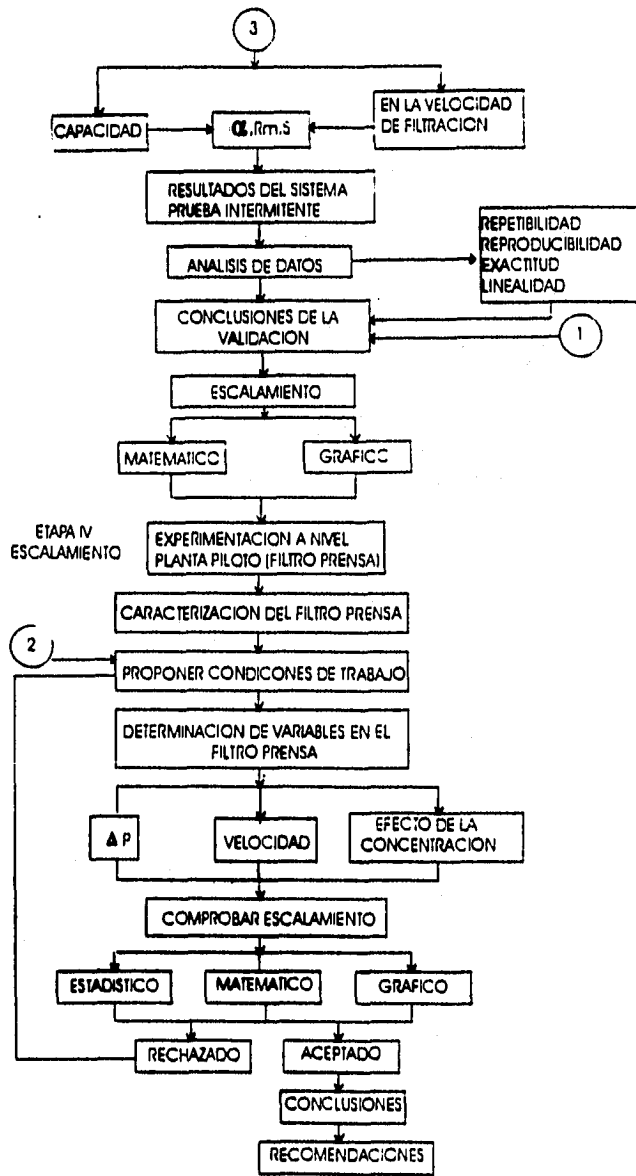
Determinar los efectos que produce el área y el espesor de la torta sobre  $k_p$  y  $B$  manteniendo la concentración de la suspensión y la presión del sistema constantes.

### Objetivo particular 4 :

Comprobar el escalamiento.

CUADRO METODOLOGICO







DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES  
(CRONOGRAMA)

ETAPAS	ACTIVIDADES	SEMANAS																											
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
I	Recolección de artículos y libros	■	■																										
	Revisión de artículos y bibliografía.			■	■																								
	Introducción, objetivos, cuadro metodológico.					■	■																						
	Nomenclatura, introducción, generalidades.						■	■																					
II	Diseño de la celda							■	■																				
	Construcción de la celda							■	■	■																			
	Caracterización del sistema total.								■	■	■																		
	Manual de operación y condiciones de operación.									■	■	■																	
III	Experimentación y validación del sistema de prueba.											■	■	■	■														
	Análisis de resultados.												■	■	■	■													
	Escalamiento al Equipo piloto.													■	■	■	■												
IV	Caracterización del equipo piloto y obtener manual de operación.																												
	Resolución numérica del escalamiento.																												
	Obtener condiciones experimentales.																												
	Desarrollo experimental del equipo piloto.																												
	Análisis de resultados.																												
	Comprobación del escalamiento.																												
	Conclusiones.																												
Recomendaciones y sugerencias.																													

\* NOTA: El desarrollo de este servicio social titulación, se tenía planeado para 8 meses, debido a condiciones de laboratorio y construcción del equipo se fue prolongando.

## NOMENCLATURA

A= Area de filtrado ( $m^2$ ).

Afc = Area del filtro celda ( $m^2$ ).

Afp= Area del filtro prensa ( $m^2$ ).

v = Volumen del filtrado por ( $m^2$ ) de área del filtro ( $m^2$ ).

C = Volumen del filtrado de torta producido equivalente en resistencia con medio filtrante ( $m^3$ ).

$C_s$  = Cantidad de sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado.

E = Espesor (cm).

$F_1, F_2, F_3$  = Factores constantes de escalamiento del sistema 1 y 2.

H = Humedad de la torta %.

K = Constante de la ecuación volumen-total ( $m^6 / seg$ ).

Kp = Pendiente de la relación  $\Delta l / \Delta v$  vs  $\sqrt{S / m^6}$ .

P = Presión de filtración ( $kgf / m^2$ ).

Rm= Resistencia del medio filtrante ( $m^{-1}$ ).

$\bar{V}$  = Volumen promedio ( $m^3$ ).

V = Volumen de filtrado (m/s).

Vf = Velocidad del filtrado ( $m^3 / seg$ ).

Ve = Volumen de filtrado equivalente ( $m^3$ ).

$W_f$  = Peso total del filtrado (kg).

k = Constante en volumen por unidad de área ( $m^6 / seg$ ).

m = Cociente de los pesos de torta húmeda y seca (libre de soluto).

s = Fracción de peso de sólidos en el lodo (kg).

v = velocidad de filtrado.

$w_f$  = peso total del filtrado por unidad de área de paño para una torta producida equivalente en resistencia al paño filtrado (kg).

x = Sólidos (kg).

$\Delta P$  = Caída de presión en el sistema ( $Kg / cm^2$ ).

$$\frac{\Delta V}{\Delta \theta} = (seg / m^3)$$

$\alpha_0$  = Resistencia específica de la torta al inicio del depósito de la filtración.

$\alpha$  = Resistencia específica de la torta depositada ( $m / kg$ ).

$\delta$  = Densidad de la torta seca ( $kg / m^3$ ).

$\xi$  = Porosidad de la torta.

$\rho$  = Densidad del filtrado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\mu$  = Viscosidad del filtrado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\sigma$  = Densidad del lodo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$\theta$  = Tiempo de filtración (seg).

$\theta_d$  = tiempo descarga(seg).

$\theta_o$  = Tiempo teórico de la formación de la torta de la resistencia equivalente a la resistencia presente al comienzo de la filtración (seg).

(20),(6),(5),(33),(34).

## GENERALIDADES DE FILTRACION

La filtración se puede definir como la operación mecánica en la cual un componente sólido insoluble de una suspensión sólido-fluido, se separa del componente líquido (filtrado) haciendo pasar a este último a través de un cuerpo poroso (malla o membrana), la cual retiene las partículas sólidas suspendidas (torta) en su superficie dentro de una estructura o ambas a la vez. (6)

El fluido puede ser un gas o un líquido. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (en un intervalo de micrómetros), o bastante grandes; rígidas o plásticas; esféricas o de forma muy irregular; agregados o partículas individuales. La alimentación o suspensión de entrada puede contener una gran carga de partículas sólidas o una proporción baja. El producto puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida. En algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas y en otros basta con una eliminación parcial. (1)

Dentro de la operación de filtración, las partículas sólidas quedan atrapadas dentro del cuerpo poroso, ocasionando la formación de una capa (torta), sobre la superficie superior del mismo. En base a lo anterior se puede decir que dicha capa porosa esta formado por tres partes :

- 1.- El cuerpo poroso usado para iniciar la filtración, llamado "filtro base o medio filtrante".
- 2.- Los sólidos en el filtro base al iniciar el corrimiento.
- 3.- Los sólidos (torta), depositados en el medio filtrante durante el corrimiento.

Las dos primeras tienden a considerarse como resistencias constantes, mientras que la última tiende a ser una resistencia variable.

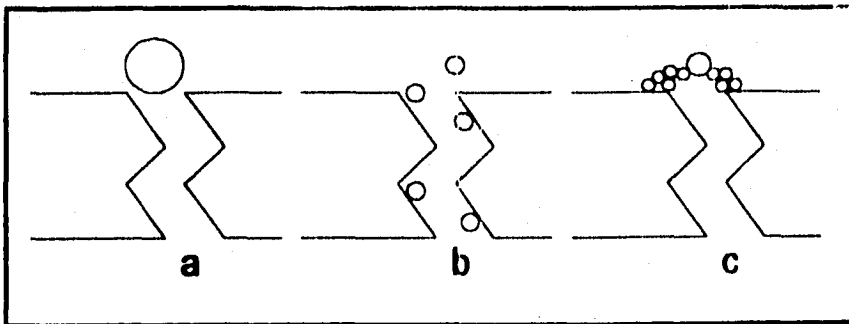
Las fuerzas utilizadas pueden ser las generadas por la simple gravedad, la aplicación de una presión por abajo o por arriba de la presión atmosférica, o aún la fuerza centrífuga.

La retención de las partículas sólidas por el medio filtrante se puede efectuar por diferentes mecanismos descritos en la figura No 1.

- a) Si el tamaño de la partícula es mayor al tamaño del poro del medio filtrante, esta no podrá atravesarlo quedando retenida dando como consecuencia un obstrucción del medio filtrante y por ende una disminución de la velocidad de filtración.
- b) Si el tamaño de la partícula es menor que el tamaño del poro del medio filtrante, el proceso se puede dar por adsorción de las mismas 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 esta puede ser limitada.

c) Existe un mecanismo intermedio, donde las partículas de tamaño algo menor al diámetro del poro del medio filtrante lo obturan, aglomerándose parcialmente al mismo, permitiendo así, por disminución aparente de la sección del poro, la retención de partículas de un tamaño muy inferior. El líquido que atraviesa inicialmente al medio filtrante al comienzo de la filtración pasará turbio hasta que se forme esta capa previa de partículas. La utilización de los denominados ayuda filtros, materiales porosos y/o fibrosos, agregados a las suspensiones de partículas muy finas y difíciles de separar con el objeto de facilitar la filtración, pueden tener como objeto la formación de la precapa mencionada.(19),(4),(28)



**Figura 1. Mecanismos de Filtración**

La teoría de filtración aunque no debe emplearse como base exclusiva para el diseño de un filtro, es importante en la interpretación de los resultados obtenidos en el laboratorio para predecir los efectos que producen los cambios de las condiciones o variables de operación sobre los parámetros del proceso, por ejemplo, sobre la velocidad de filtración, la eficiencia o efectividad de la separación, o bien sobre las constantes de filtración como la resistencia específica de la torta y del medio filtrante. El uso de esta teoría está limitada fundamentalmente por el hecho de que las características de la suspensión influye de manera notable sobre la efectividad del proceso de separación.(36),(40)

## TEORIA DE LA FILTRACION

Caída de presión a través de la torta.

En la figura No.2, se muestra la sección transversal de la torta de filtración y medio filtrante, a un tiempo definido  $t$  (s) desde el inicio del flujo de filtrado. En dicho momento, el espesor de la torta mide  $L$  (m). El área de la sección transversal del filtro es  $A$  ( $m^2$ ) y la velocidad lineal del filtrado en la dirección  $L$  es  $V$  (m/s), basada en el área de filtración  $A$  ( $m^2$ ).

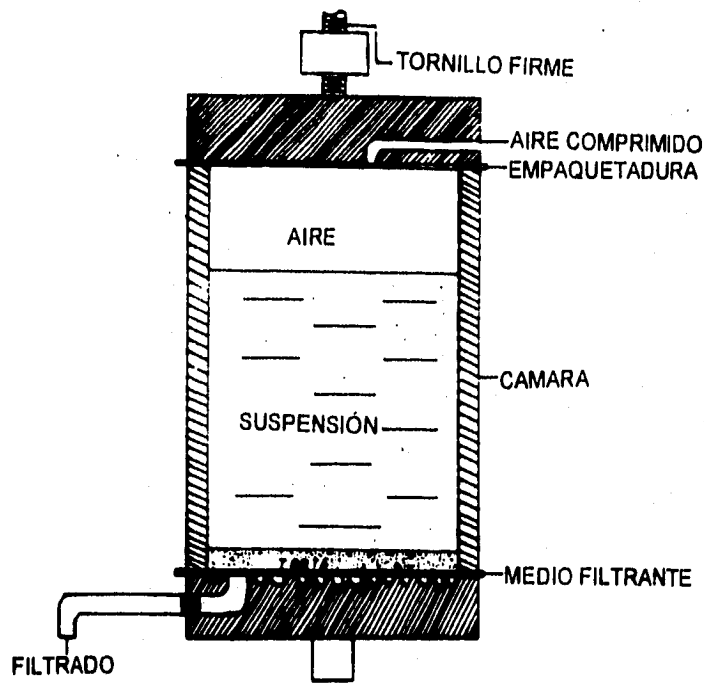


Figura 2: Sección transversal de la torta de filtración y medio filtrante

El flujo de filtrado a través del lecho empacado de la torta puede describirse por la ecuación similar a la ley de Poiseville, suponiendo un flujo laminar en los canales del filtro

En la ecuación No.1, de Poiseuille (referencia) para flujo laminar en un tubo recto, que se describe como sigue (30) :

$$-\Delta P/L = 32 \mu v / D^2 \quad (1)$$

$-\Delta P$  = Caída de presión total ( $N / m^2$ ).  
 $V$  = Velocidad en el tubo abierto(m/s).  
 $D$  = Diámetro(m).  
 $L$  = Longitud(m).  
 $\mu$  = Viscosidad(Pa.s).

Para el flujo laminar en la torta, se ha demostrado que puede aplicarse la relación de Carman-Kozeny.

$$-\Delta P_c / L = K_1 \mu V (1 - \xi)^2 S_o / \xi^3 \quad (2)$$

$K_1$  = Constante 4.17 para partículas en desorden de tamaño.  
 $\mu$  = Viscosidad del filtrado (Pa.s).  
 $v$  = Velocidad lineal basada en el área de filtración (m/s).  
 $E$  = Espesor de la torta.  
 $S_o$  = Área superficial específica de las partículas sólidas.  
 $-\Delta P_c$  = Caída de presión en la torta ( $N / m^2$  ).  
 $\xi$  = Fracción de espacios vacíos o porosidad de la torta.

La velocidad lineal es:

$$v = dv/dt A \quad (3)$$

$A$  = área del filtro ( $m^2$ ).  
 $V$  = Volumen total ( $m^3$ ) de filtrado recolectado al tiempo .

El espesor de la torta  $L$ , puede relacionarse con el volumen del filtrado  $V$ , por medio de un balance de materiales. Si  $C_s$  es Kg de sólidos por  $m^3$  de filtrado un balance de sólidos nos da:

$$LA (1 - \xi) \rho_p = C_s (V + \xi EA) \quad (4)$$

Donde  $\xi$  = Porosidad de la torta.

$\rho_p$  = Densidad de partículas sólidas de la torta  $\text{Kg/m}^3$  del sólido.

El término final es el volumen del filtrado retenido en la torta, suele ser pequeño y se desprecia.

Sustituyendo la ec.3 en la 2 y usando 4 para eliminar L, se obtiene la ecuación final que describe la velocidad puntual.

$$\frac{dv}{Adt} = \frac{\Delta P_c}{\frac{K_1(1-\xi)S_0^2 \mu C_s V}{\rho_p \xi^3 A}} = \frac{\Delta P_c}{\mu \alpha C_s V} \quad (5)$$

Donde  $\alpha$  es la resistencia específica de la torta ( $\text{m/kg}$ ), que se define como:

$$\alpha = \frac{K_1(1-\xi)S_0^2}{\rho_p \xi^3} \quad (6)$$

La ecuación 6 indica, que la resistencia específica de la torta es una función de la fracción de espacios vacíos ( $\xi$ ) y  $S_0$ , también es una función de la presión, pues esta puede afectar a  $\xi$ .

Para la resistencia del medio filtrante, por analogía con la ecuación 5, puede escribirse:

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{-\Delta P_f}{\mu R_m} \quad (7)$$

Donde  $R_m$ , es la resistencia del medio filtrante al flujo de filtrado ( $\text{m}^{-1}$ )

$-\Delta P_f$  = Caída de presión a través del medio filtrante ( $\text{N/m}^2$ ).

Quando se trata  $R_m$  como constante empírica, incluye tanto la resistencia al flujo en las condiciones de tubería hacia y después del filtro como resistencia del medio filtrante.



$$R_m = \frac{\alpha C_s V_e}{A}$$

$V_e$  = volumen de filtrado equivalente para formar una torta de filtración, cuya resistencia sea igual a  $R_m$ .

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_f \quad (8)$$

$\Delta P$  = Caída de presión total en el sistema  $Kgf / m^2$

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha C_s V_e / A + R_m)}$$

desarrollando

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha C_s V / A + (\frac{\alpha C_s V_e}{A}))}$$

Rearreglando términos comunes

$$\frac{dv}{Adt} = \frac{\Delta p}{(\frac{\mu \alpha C_s}{A})(V + V_e)} \quad (9)$$

El volumen también puede relacionarse con la cantidad de sólidos (kg) acumulados como masa de torta seca ( $W$ ).

$$W = C_s V = (\rho C_x / 1 - m C_x) V \quad (10)$$

$C_x$  = Fracción de masa de sólidos en la suspensión.

$m$  = La relación de masa de la torta húmeda a la torta seca.

$\rho$  = La densidad del filtrado ( $Kg / m^3$ )

## COMPRESIBILIDAD DE LA TORTA

La ecuación general de filtración, se basa en la ecuación de Kozeny y Carman que describe el flujo de un fluido a través de lechos empacados. Esta ecuación a su vez considera que la ley de Poiseuille es válida para este fenómeno, 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 que la compresibilidad de la torta sea considerable, la ley de Poiseuille no es aplicable, ya que el gasto de filtrado 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.

Se ha sugerido la siguiente relación empírica para la relación entre  $\alpha$  y  $\Delta P$ .

$$\alpha = \alpha_0 (\Delta P)^s$$

$s$  = índice de compresibilidad.

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

Linearizando esta ecuación, tenemos que la pendiente corresponde a la compresibilidad de la torta ( $s$ ).

$$\log \alpha = \log [ \alpha_0 (\Delta P)^s ]$$

$$\log \alpha = \log \alpha_0 + \log (\Delta P)^s$$

$$\log \alpha = \log \alpha_0 + s \log (\Delta P)$$

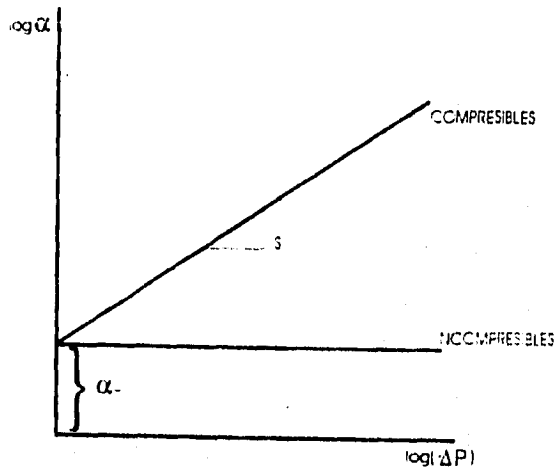
El exponente " $s$ " es una medida cuantitativa de la compresibilidad de la torta y toma valores entre 0 y 1.

Teóricamente :  $s = 0$  para tortas incompresibles

$s = 1$  para una torta totalmente compresible.

En la práctica  $0.2 \leq s \leq 0.8$

En la gráfica siguiente se muestra como se ve afectada la resistencia de la torta con los cambios de presión.



Las tortas incompresibles, son aquellas que no se ven afectadas por la presión que se ejerza sobre ellas debido a su estructura rígida, es decir, tiene una estructura porosa que permite que fluya el líquido que se ha filtrado, mientras que las tortas compresibles se deforman por la presión que se ejerce sobre ellas. (31), (32), (33), (34), (15)

#### ECUACIONES DE FILTRACION PARA PROCESOS A PRESION CONSTANTE

##### 1.- Ecuaciones básicas para la velocidad de filtración.

Cuando la filtración se lleva a cabo en condiciones de presión constante.

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\alpha \mu C_s}{A^2 (-\Delta P)} l' + \frac{\mu}{A(\Delta P)} R_m = K_p l' + B \quad (11)$$

$$Kp = \frac{\mu \alpha^2 s}{A^2 (\Delta P)^2} [=] s / m^2 \quad (12)$$

$$B = \frac{\mu Rm}{A^2 (\Delta P)} [=] s / m \quad (13)$$

Para una presión constante  $\alpha$  es una constante.

Integrando para obtener el tiempo de filtrado.

$$\int_0^{t=t} dt = \int_0^{v=v} kp + Bdv \quad (14)$$

$$\int_0^{t=t} dt = kp \int_0^{v=v} \frac{v}{v} dv + B \int_0^{v=v} dv \quad (15)$$

$$t = kp \frac{v^2}{2} + Bv \quad (16)$$

$$t = \frac{m}{\Delta P} \left( \frac{\alpha^2 s}{2} (v/A)^2 + Rmv/A \right) \quad (17)$$

Para evaluar la ec. 15 es necesario conocer a  $\alpha$  y Rm.

## 2.- Ecuaciones para lavado de tortas de filtrado y tiempo de ciclo total

El lavado de una torta después de un ciclo de filtrado se lleva a cabo por desplazamiento del filtrado. La cantidad de líquido de lavado debe ser suficiente para lograr el efecto que se desea.

Para cálculos de velocidad de lavado, se supone que las condiciones de presión durante el mismo son iguales a las que existían al final de la filtración.

Se supone también la estructura de la torta no resulta afectada cuando el líquido de lavado desplaza al líquido de suspensión en la torta.

Para una filtración a presión constante y usando la misma presión a la que termino la filtración para el lavado, la velocidad final de lavado es el recíproco de la ec. 11.

$$(dV/dt)_f = 1/kp V_f + B \quad (18)$$

donde

$(dV/dt)_f$  = Velocidad de lavado ( $m^3/s$ )

$V_f$  = Volumen total de filtrado para el periodo al final de la filtración ( $m^3$ ).

$$(dV/dt)_f = 1/(4 Kp V_f + B) \quad (19)$$

Después de completar el lavado, se requiere un tiempo adicional, (tiempo muerto en el caso de equipos intermitentes) para extraer la torta, limpiar el filtro y volverlo a armar.

El tiempo total del ciclo ( $\theta_c$ ) de filtración es la suma del tiempo de filtración, más el tiempo de lavado, más el tiempo de descarga.

$$\theta_c = \theta_f + \theta_L + \theta_d$$

$\theta_c$  = Tiempo total del filtro  $\theta_f$  = Tiempo de filtrado  $\theta_L$  = Tiempo de lavado

$\theta_d$  = Tiempo de descarga

(27)

### 3.- Ecuaciones para filtración a velocidad constante.

La ec.9 puede reordenarse para obtener la siguiente expresión para una velocidad constante.  $(dV/dt)_f$ .

$$\Delta P = \left[ \left( \frac{\mu \alpha C_s}{A^2} \right) \left( \frac{dV}{dt} \right)_f \right] V_f + \left[ \left( \frac{\mu R_m}{A} \right) \left( \frac{dV}{dt} \right)_f \right] = K_v V_f + c \quad (20)$$

Donde:

$$K_v = \left[ \left( \frac{\mu \alpha C_s}{A^2} \right) (dV/dt) \right] = \quad (21)$$

$$C_s = \left[ \left( \frac{\mu R_m}{A} \right) (dV/dt) \right] = \quad (22)$$

Suponiendo que la torta sea incompresible,  $K_v$  y  $C_s$  son constantes características de la suspensión, la torta, la velocidad de filtrado, etc.

Estableciendo la ec.20 en forma diferencial:

$$-\Delta P = \left[ \left( \frac{\mu \alpha C_s}{A^2} \right) (dV/dt)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\mu R_m}{A} \right) (dV/dt) \right] \quad (17), (9)$$

## CLASIFICACION DE EQUIPOS

Los filtros pueden ser clasificados en diversas agrupaciones y son seleccionados en gran parte por aspectos económicos y en base a las necesidades a resolver de la industria que la requiera, pero principalmente deberán tomarse en cuenta los siguientes factores :

- 1.- Viscosidad, densidad y reactividad química de la suspensión.
- 2.- Tamaño de partícula sólida, distribución de tamaños, forma, tendencia a la floculación y deformidad.
- 3.- Concentración de la suspensión.
- 4.- Cantidad de material a manejar.
- 5.- Grado de separación requerida.
- 6.- Costo relativo de mano de obra, capital y energía.

(5)

Uno de los criterios de clasificación puede ser de acuerdo a la fuerza propulsiva :

- Filtros por gravedad
- Filtros al vacío
- Filtros a presión

Filtros por gravedad :

- Filtro intermitente de agua

Filtros a presión :

- Filtro de prensa de : placas y marcos  
placas cóncavas

- Filtro de hojas : verticales  
horizontales

- Filtro tubular

- Filtro de placas horizontales

Filtros a vacío :

- Filtro de hojas

- Filtro tubular

- Filtro de fondo falso

- Filtro de banda horizontal

- Filtro de tambor rotatorio

Los filtros por gravedad únicamente aprovechan la fuerza de gravedad y presión hidrostática de la columna de materiales para filtrar.

Uno de los métodos de clasificación de equipo más usual es el que se basa en un ciclo : por lotes, cuando se extrae la torta después de cierto tiempo; o continua; cuando la torta se va extrayendo a medida que se forma :

A.- Filtros continuos

B.- Filtros intermitentes o discontinuos

(14),(28)

A) FILTRACION CONTINUA :

La filtración continua está caracterizada por ciclos cortos, la torta puede descargarse desde una sección de la superficie filtrante, mientras el flujo continua en otra sección, ejemplos de este tipo son : filtros a vacío de tambor rotatorio, de disco, las variedades de banda horizontal y charolas .

Dentro de los filtros continuos podemos encontrar :

**- FILTROS POR GRAVEDAD :**

Donde la fuerza impulsora es la presión de la columna del líquido sobre el medio filtrante y los cuales son :

- \* de cama o de arena
- \* de saco
- \* de tanque de fondo falso

Son muy utilizados en el tratamiento de fluidos que contienen pequeña proporción de materiales sólidos en suspensión.

**- FILTROS A VACIO :**

La fuerza impulsora es la succión del lado del medio filtrante o salida de filtrado :

- \* de tanque de fondo falso
- \* de hojas
- \* de banda
- \* de disco
- \* de tambor rotatorio :
  - Compartimiento simple
  - Compartimiento múltiple

Siendo el filtro tambor rotatorio al vacío uno de los más representativos de entre los que presentan un ciclo continuo, se toma como ejemplo para describir el proceso continuo.



## FILTRO PRENSA :

En 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 usado en la industria. Aunque en la actualidad está siendo sustituido por filtros continuos, tiene las ventajas de un bajo costo inicial, poco mantenimiento, extrema flexibilidad y facilidad de inspeccionar en su interior, tiene la relación más baja de volumen-área, lo que hace que ocupen poco espacio y que tengan poco líquido sin filtrar al finalizar el ciclo de filtración. Sin embargo presenta requerimientos de mano de obra en general excesivos.

Este tipo de filtros contiene una serie de placas sólidas alternas cuyas caras están horadadas ranuradas o perforadas para permitir el drenaje, y marcos huecos en donde se recogen los sólidos durante la filtración, las placas están recubiertas por un medio filtrante, la suspensión entra a presión en cada compartimiento, el líquido pasa a través de un medio filtrante y sale por un tubo de descarga, dejando atrás una pasta húmeda de sólidos.

El diseño más común del filtro prensa se muestra en la figura 4.

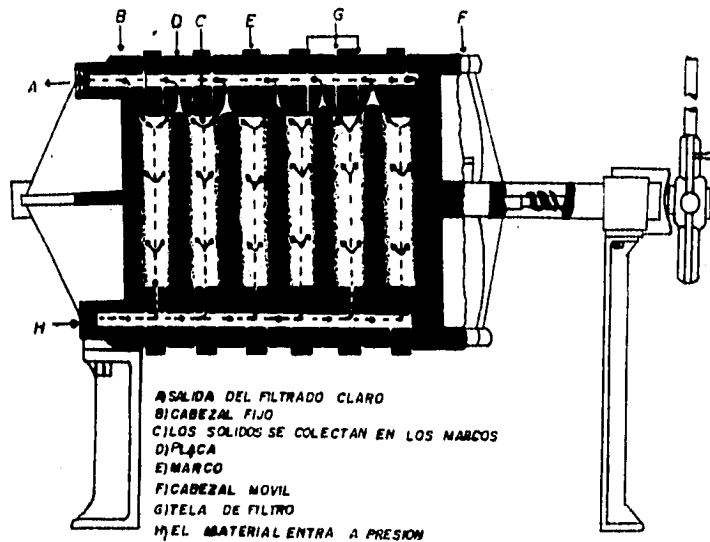


Figura 4 : FILTRO PRENSA DE PLACAS Y MARCOS

Esta formado por placas y marcos alternados, sosteniéndose por una percha y sujetados mediante un mecanismo hidráulico o con un tornillo. El medio filtrante es sostenido sobre los platos extendiéndolo sobre ambas caras y puede ser una tela natural o sintética, papel filtro o tela de alambre.

Cuando la prensa es cerrada, el medio filtrante actúa como una empacadura, sellando los platos y marcos y formando un canal continuo. La suspensión se bombea a la prensa bajo presión. La suspensión llena los marcos en paralelo. El líquido fluye a través del medio filtrante mientras los sólidos forman una capa de lado del marco.

El filtrado fluye entre la tela filtrante y la cara del plato a la tubería de salida mientras la filtración procede, la torta crece sobre la tela filtrante, hasta que las tortas formadas en cada cara del marco se encuentran y se hacen contacto en el centro. Cuando esto ocurre, el flujo del filtrado el cual ha estado disminuyendo continuamente al ir creciendo la torta, disminuye bruscamente, hasta llegar a ser solo un goteo. Usualmente la filtración se detiene antes de que esto ocurra. Si es necesario puede introducirse líquido de lavado para eliminar las impurezas solubles contenidas en el sólido, después de la cual puede "insuflar" la torta con vapor o aire para desplazar todo el líquido residual que sea posible.

Se desarma la prensa y se retira la torta de sólidos del medio filtrante. En algunos casos en los filtros de prensa estas operaciones se realizan automáticamente.

El lavado en el filtro prensa puede requerir varias horas, puesto que el fluido de lavado tiende a fluir por el camino más fácil sin penetrar por las partes fuertemente compactas de la torta. Si la torta es menos densa en algunas partes que en otras, como sucede generalmente, gran parte del líquido de lavado es ineficaz. Si el lavado debe ser excepcionalmente bueno, lo mejor es hacer una suspensión con la torta parcialmente lavada y un gran volumen de líquido y volver a filtrar.

#### **Ventajas :**

- \* Tiene un costo inicial bajo.
- \* Requiere de poco mantenimiento.
- \* Es versátil.
- \* Es de fácil inspección interna.
- \* Tiene una relación baja de volumen/área.
- \* La aplicación de alta presión permite las filtraciones relativamente rápidas y permite separaciones difíciles.

Desventajas :

- \* Requiere de mano de obra excesiva.
- \* El lavado de torta puede ser imperfecto.
- \* Tiene generalmente fugas y goteos.
- \* La limpieza del área de trabajo es un problema.

(28)

### **FACTORES QUE AFECTAN LA FILTRACION**

La filtración se ve afectada por múltiples factores que dependiendo del tipo de suspensión que se este trabajando tendrá diferentes efectos :

#### **EFECTO 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 DEL TAMAÑO DE PARTICULA**

Pequeños cambios en el tamaño de partículas afectan al coeficiente  $s$  y cambios mayores afectan inclusive, la compresibilidad de la torta.

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

La forma individual de cada partícula influye considerablemente sobre la permeabilidad y estructura de la torta. Cuando esta última esta constituida por partículas que tienden a ser fácilmente deformadas o rearregladas bajo la presión, son

llamadas tortas COMPRESIBLES y aquellas que llegan a ser deformadas en un grado ligero son consideradas como INCOMPRESIBLES.

Es considerable el efecto que tiene el tamaño de la partícula sobre la resistencia de la torta y del medio filtrante.

#### EFFECTO DE LA CONCENTRACION

Existe 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 disoluciones extremas, los mismos sólidos que, cuando se depositan en una suspensión más concentrada siguen el patrón de filtración en el medio filtrante. Este efecto implícito favorece el aumento en la concentración de la suspensión a filtrar. Las partículas de una suspensión concentrada tienden a distribuirse uniformemente sobre la superficie del filtro, formando puentes. Como resultado de las suspensiones de alta concentración generalmente dan lugar a tortas de resistencia más pequeña que las formadas a partir de suspensiones diluidas.

#### EFFECTO 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 los que una suspensión puede ser calentada son fijados por el costo de calentamiento y, en filtraciones al vacío, por la presión de vapor del filtrado.

## EFECTO DEL TIPO DE MEDIO FILTRANTE

Al 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.

La función del medio filtrante es generalmente la de actuar como soporte para la torta filtrante, mientras las capas iniciales de la torta proporcionan el verdadero filtro.

El medio filtrante debe ser mecánicamente fuerte, resistente a la acción corrosiva del fluido, y debe ofrecer poca resistencia como sea posible al flujo del filtrado.

Normalmente se utilizan tejidos, pero los materiales granulares y los sólidos porosos resultan útiles para la filtración de líquidos corrosivos en unidades discontinuas. Una característica importante en la selección de un tejido es la facilidad en la separación de la torta, puesto que es un factor clave en el funcionamiento de las unidades automáticas modernas.

## EFECTO DE LA PRESION

En la filtración de suspensiones con la presencia de sólidos granulares o cristalinos, un aumento en la presión causa un aumento casi proporcional en la velocidad del flujo. Por otro lado, en los precipitados viscosos o 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 filtro ayuda, se ha encontrado que una velocidad de flujo constante durante la filtración es más satisfactoria que una presión constante, ya que esta última ocasiona una pobre resistencia de la torta. De hecho, la filtración de suspensiones prácticamente incompresibles es más satisfactoria cuando se usa una baja presión al inicio de la corrida. Esto es esencialmente importante en la filtración de suspensiones de bajo contenido de sólidos.

Como la mayoría de los filtros a presión son alimentados por bombas centrífugas, su operación rara vez es a presión constante o a velocidad constante, sino que, de acuerdo a las características de la bomba es esencialmente a velocidad

constante durante su primera etapa y a presión constante durante la última parte del ciclo.

#### **EFEECTO DEL ESPESOR DE LA TORTA**

La teoría de la filtración demuestra que despreciando la resistencia del medio ( $R_m$ ) la velocidad de filtración es inversamente proporcional a la cantidad de torta depositada. 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 mover la torta producida y preparar el medio para el siguiente ciclo.

Por ejemplo, si la resistencia específica de la torta es tan alta que aún una torta muy delgada ocasiona una resistencia al flujo excesiva con respecto a  $R_m$ , la máxima productividad del filtro se obtiene con una torta extremadamente delgada. Sin embargo esta torta tan delgada puede ocasionar mayor dificultad de descarga, mayor cantidad de ciclos de lavado, más mano de obra, etc.

Por esto, la optimización del balance de cuestiones técnicas y económicas que engloban todos los factores anteriores.

Las variables más importantes de las cuales depende la velocidad de filtración serán entonces :

- a) Caída de presión desde la alimentación hasta el lado más lejano del medio filtrante.
- b) El área de la superficie filtrante.
- c) Viscosidad de filtrado.
- d) La resistencia de la torta filtrante.
- e) La resistencia del medio filtrante y de las capas iniciales de la torta.

(28),(7)

## SISTEMA DE PRUEBA DE FILTRACION A PRESION CONSTANTE

El filtro más adecuado para una operación dada será aquel que cumpla las necesidades a un costo global mínimo. Como el costo del equipo estará relacionado con el área filtrante, normalmente es de desear el obtener una elevada velocidad global de filtración. Esto implica la utilización de presiones relativamente elevadas pero las presiones máximas suelen estar limitadas por consideraciones de diseño mecánico y de las características de la torta y de los sólidos a ser separados.

Otras características que son de desear en un filtro incluyen la facilidad de descarga de la torta filtrante en una forma apropiada, y en un método para observar la calidad de filtrado obtenido de cada sección de la planta.

### **Los factores más importantes en la selección de un filtro son:**

La resistencia de la torta filtrante, la cantidad a filtrar y la concentración de sólidos. (12)

Las características de filtración obtenidas en las pruebas en escala reducida con filtros de prueba, servirán para recomendar el tamaño y tipo de filtro adecuado.

Algunas veces las pruebas del problema del filtrado no común muestran la necesidad de hacer un estudio en plantas piloto a menor escala.

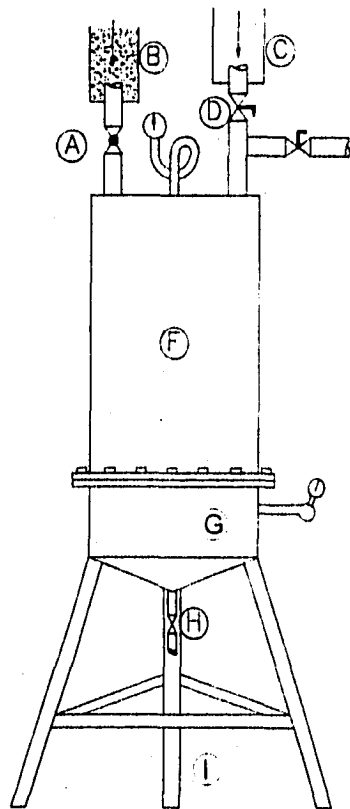
Resulta más conveniente que los fabricantes de filtros construyan dichos filtros a escala reducida, para proporcionarcelos al cliente a una determinada renta a fin de hacer las pruebas en el sitio donde esta localizada la planta. (21)

Un típico aparato para pruebas a presión es el mostrado en la figura 5.(18)

La fuente de presión es un suministro de aire comprimido, con un apropiado regulador.

La presión requerida de filtración es fijada con el regulador, la suspensión es introducida a través de la válvula A y manteniendo la válvula D abierta, se cierra entonces la A y la D se mantiene abierta para admitir la entrada de aire y comenzar así la filtración, la suspensión se introduce por la tubería B y comienza la filtración.

Durante el proceso el volumen filtrado es medido en el colector I, y se evalúa el fluido obtenido en un tiempo progresivo



**PARTES**

- A = Válvula de globo
- B = Alimentador de la suspensión
- C = Alimentador de aire
- D = Valvula de aguja
- F = Cuerpo de la celda
- G = Tanque de retención
- H = Descarga
- I = Colector del fluido

**Figura 5: FILTRO PRUEBA (CELDA A PRESION).**

Es importante no permitir que el aire penetre en la torta, esto puede ocasionar la detención de la prueba : para evitar ese problema se cierra D simultáneamente abriendo A, mientras que termina el proceso. Al término la base de la celda es removida, se separa y, se obtiene la torta para hacer sus determinaciones, las propiedades de los componentes sólido, y líquido, la humedad, la porosidad, el espesor y el cálculo de las constantes de filtración y todo lo que se estime conveniente.



El terreno obtenido en este camino se desviará del curso teórico, cuando la cámara esta llena. Ruth (32), discutió esta forma de prueba en detalle y demarco el método que a continuación se resume y que es aplicable a las diferentes tortas:

- 1.- Una concentración uniforme de la suspensión debe ser mantenida durante el período de prueba.
- 2.- Los aparatos pueden 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 fracturar las partículas.
- 4.- El filtrado podrá fluir libremente, demora del dispositivo.
- 5.- La temperatura se mantiene constante para no afectar la viscosidad de la suspensión.
- 6.- En orden para evitar algunos efectos de sedimentación, el medio filtrante debe estar colocado en posición horizontal hasta el fondo de la cámara.(32),(34)

### **CRITERIOS DE ESCALAMIENTO**

Como el objetivo del trabajo es hacer una metodología de escalamiento y en los procesos químicos se lleva a cabo utilizando criterios que se basan en un análisis adimensional o de las ecuaciones más relevantes del proceso, se plantea el principio de semejanza que se ocupa de las relaciones entre sistemas físicos de diferentes tamaños justamente lo que requerimos (por que tenemos diferentes áreas). Los estados de semejanza de especial interés en la ingeniería química 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 sujetos 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: si dos sistemas que operan con fluidos son geoméricamente 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 las masas 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.

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 sólo debe de haber una relación fija entre las concentraciones de las especies químicas que se desean comparar.

"Sistemas geoméricamente y térmicamente semejantes, son semejantes químicamente, cuando las diferencias de concentración correspondientes mantienen una razón constante de una a otro, y si los sistemas están en movimiento son cinemáticamente semejantes".(12),(20)

De acuerdo a las características del proceso se utilizará un escalamiento geométrico (de áreas) y se harán cálculos respectivos para las constantes de la

**filtración, así encontraremos el factor de escalamiento buscado. (Esto se realiza de acuerdo al método de análisis experimental que se plantea en las siguientes hojas.)**

## METODOS DE VALIDACION APLICABLES AL SISTEMA

Al diseñar un sistema de filtración intermitente es necesario trabajar con el para estar en posición de discutir la validez de los datos obtenidos y de la secuencia metodológica de escalamiento planteada, es necesario recurrir a herramientas como la estadística que permite englobar todos los eventos realizados dando resultados que nos permitan decidir si los eventos son reproducibles y en que forma se desvían.

Junto con la estadística se encuentran otros criterios, como los matemáticos y gráficos, que nos sirven como base para obtener relaciones entre varios sistemas y así poder predecir resultados sin la necesidad de experimentar a niveles mayores. Es fundamental apoyar la validación en el uso de estas herramientas con la finalidad de conocer los requerimientos energéticos, masivos y dimensionales involucrados en algún proceso a mayor dimensión a estudiar.

Por eso para afirmar que el sistema que se diseñará sirve para el objetivo propuesto, se le aplicará a los datos experimentales una metodología de validación que a continuación se describe.

Se entiende por validación el establecer evidencia documentada de que un sistema funciona de acuerdo a como fue diseñado, obteniendo un alto grado de seguridad de que el sistema producirá los atributos y resultados predeterminados.

Para poder llevar a cabo la validación, de un sistema, es necesario realizar principalmente dos etapas previas :

- a) Evaluación de la instalación.
- b) Protocolo de validación.

El primer punto involucra la revisión de todos los aspectos claves de la instalación del sistema con que se trabaje, debiendo estar en concordancia con las recomendaciones del fabricante y con los propósitos para el que fue diseñado.

El protocolo de validación es un plan de trabajo, experimental y prospectivo, cuyo objetivo es que al ejecutarse, produzca evidencia documentada, de que el sistema ha sido validado. Generalmente incluye una definición del sistema a ser validado, las variables de operación, parámetros a ser controlados y replicas consideradas apropiadas para elaborar los análisis estadísticos. Se puede incluir también los parámetros de aceptación para cada criterio a evaluar, así como la definición de los límites operacionales con que se espera que trabaje el sistema.(10) Algunas de las pruebas generalmente empleadas en procesos de validación son : exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad, linealidad, reproducibilidad, límite de detención, límite de cuantificación, repetibilidad.

- Exactitud: Se puede definir como la aproximación de una medición, con un valor real conocido, para la cantidad siendo evaluada o como la corrección de una medida donde el verdadero valor se obtiene al conocer la magnitud del error.

La evaluación de la exactitud se hace con referencia a lo que haya decidido el experimentador una vez evaluado su proceso.

- Precisión: Se refiere al resultado de agrupamientos de los términos : repetibilidad y reproducibilidad ( es una medida de reproducibilidad de las medidas).

Hay tres maneras ordinarias de evaluarlas :

a) mediante la desviación estándar.

b) mediante la varianza.

c) mediante el rango.

- Repetibilidad: Se refiere a la variación de un conjunto de respuestas experimentales dentro de un sistema, entre resultados sucesivos que puede ser efecto de factores tales como el operador o condiciones ambientales (promedio de medidas efectuadas por varios operadores o en diferentes días).

- Reproducibilidad: Se refiere a la respuesta de un conjunto de valores experimentales en condiciones de trabajo diferentes (para evaluarla se utilizarán diferentes fluidos).

- Sensibilidad: Se refiere al resultado de agrupamientos de dos términos, límite de detección y límite de cuantificación. Se define como la mínima diferencia entre respuestas de una prueba que puede conducir a resultados con una diferencia significativa.

- Límite de detección. Se refiere a la más baja respuesta detectable por los más sensitivos equipos.

- Límite de cuantificación. Se refiere a la más baja respuesta detectable que puede ser determinada con precisión y exactitud aceptables.

- Especificidad o Selectividad. Se refiere a la habilidad del método para medir precisa y específicamente la respuesta del análisis en presencia de compuestos como impurezas, precursores de síntesis, excipientes o productos de degradación.

- Linealidad. Se refiere a la habilidad del sistema de producir resultados que sean proporcionales, ya sea directamente o por transformación matemática, a la variable dependiente, dentro del rango de condiciones en el que se piense emplear el sistema a validar.

Las pruebas estadísticas a aplicar para los diferentes criterios varían en función de la cantidad de datos, las condiciones experimentales e información a obtener, en

general, se aplican pruebas de hipótesis, varianzas, covarianzas y pruebas alternativas como análisis de bloques o Duncán y Tokey.(3),(8),(13),(22),(23),(29)

El método de análisis experimental plantea y conjuga todos estos criterios. Las principales tendencias gráficas se interpretan con herramientas matemáticas y los datos tabulados se analizan con criterios estadísticos, .

## **ETAPA II**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

**DE UN SISTEMA PRUEBA DE**

**FILTRACION INTERMITENTE**

Objetivo particular 1 :

Obj. 1.1

#### **Diseño de la celda.**

Se tomó como base fundamental la construcción de una celda que nos permitiera 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  $-\Delta P$  total), espesor de los sólidos retenidos (torta de filtración), manejo de diversos lotes de suspensión, y la aplicación de ayudafiltros, en caso necesario. Así mismo, la fuerza de impulso de la suspensión se consideró que fuera suministrada por un compresor de aire y regulada por una válvula reguladora de presión.

De acuerdo a lo anterior y en vista de que la filtración esta sujeta a un régimen dinámico, la teoría de los modelos no puede entrar dentro del escalamiento de los experimentos de filtración porque las magnitudes absolutas de las partículas sólidas, los pasajes de los fluidos así como su forma geométrica, están determinadas por las condiciones del proceso, en este sentido, se presenta la necesidad de trabajar fundamentalmente con una muestra de la suspensión original la cual deberá corresponder punto a punto y así buscar que las diferencias que se encuentren en la celda propuesta correspondan específicamente a las debidas a los cambios de modelo, esto deberá ser perfectamente controlado seleccionando las condiciones experimentales más adecuadas; así cuando las diferencias en la suspensión original y la utilizada en la celda propuesta sean eliminadas, se pueden aplicar diversas teorías que permitan efectuar el escalamiento con la menor desviación posible para las condiciones previstas a gran escala y así utilizar factores de escalamiento que nos permitan establecer, ya sea condiciones de operación, escalamiento de áreas de filtración o bien condiciones de utilización de presiones diferentes.

De acuerdo a lo anterior para el diseño de la celda se consultaron los principios de diseño de los recipientes a presión.(2),(30)

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



Todo recipiente a presión esta formado por :

- a) El envolvente.
- b) Dispositivos de sujeción o apoyo del propio equipo.
- c) Conexiones, por las que entran o salen los fluidos.
- d) Accesorios (en el interior y exterior) y dependerán de las necesidades del equipo.

#### a) ENVOLVENTES

Es una envoltura metálica que forma propiamente el recipiente. La envoltura se forma de dos elementos básicamente :

**CARCASA** : Esta formada por una serie de virolas soldadas unas a otras, entendiéndose por virola un trozo de tubería o una chapa que convenientemente curvada y soldada forma un cilindro sin soldaduras circunferenciales.

Cuando el diámetro de la carcasa es menor de 609 mm (24") se utiliza una tubería y en diámetros superiores se realiza a partir de chapa, las dimensiones de estas suelen ser entre 2 y 2.4 m de anchura y 6-8 m de longitud.

**FONDOS** : Los fondos son las tapas que cierran la carcasa. Los fondos generalmente son semiesféricos existiendo una gran diversidad de tipos entre ellos, y como excepción existen los fondos cónicos y planos de muy reducida utilización.

Todos estos fondos se realizan a partir de chapas, a la que mediante la estampación se le da la forma deseada.

En todos los fondos se realiza la transición de la figura bombeada a una cilíndrica, que es la carcasa (lineas de transición o tangencia) la cual está sometida a grandes tensiones axiales por lo que los fondos bombeados se construyen con una parte cilíndrica denominada pestaña o faldilla, cuya altura mínima "h" varia según la norma o código de cálculo utilizado, pero en general deberá ser no menor que el mayor de los siguientes valores :

$$h > 0.3 D_e \times e_f$$

$$h > 3 \times e_f$$

$$h > 25 \text{ mm}$$

Donde

$D_e$  = Diámetro exterior de la carcasa (mm)

$e_f$  = Espesor del fondo (mm)

Con un valor máximo de  $h = 100 \text{ mm}$

Los tipos más usuales de fondos son:

- Semiesféricos
- Elípticos
- Policéntricos
- Cónicos
- Planos

Los semiesféricos están formados por media esfera soldada a la carcasa. El espesor requerido para resistir la presión es inferior en la carcasa cilíndrica.

Como dato aproximado se puede adoptar que el espesor del fondo es la mitad del espesor de la carcasa.

La construcción de este tipo de fondo es más costosa que el resto de los fondos bombeados por lo que su utilización se restringe a casos específicos de grandes espesores o materiales especiales.

Se utilizan fondos semiesféricos en los siguientes casos :

- \* Recipientes en acero al carbono.
- \* Recipientes con acero aleado.
- \* Recipientes en acero inoxidable, o altamente aleado.

Los fondos elípticos están formados por una elipse de revolución, para bajas y medias presiones, tienen facilidad de estampación.

Los fondos planos consisten en una chapa plana soldada directamente a la carcasa. Su utilización es muy escasa por presentar una sección muy poco resistente a la presión, lo que requiere grandes espesores. Su uso se restringe a recipientes de muy baja presión y diámetro pequeño.

#### b) DISPOSITIVOS DE SUJECION O APOYO.

Todo recipiente debe ser soportado, es decir, su carga debe ser transmitida al suelo o alguna estructura que las transmite al suelo, esta misión la cumplen los dispositivos de sujeción o apoyo.

Las cargas a las que está sometido el recipiente y que transmitirá al suelo a través de su apoyo son :

- Peso propio
- Peso del líquido en operación normal o agua en la prueba hidráulica
- Peso en todos los accesorios internos y externos
- Cargas debidas al viento
- Cargas debidas al terreno

Los dispositivos de apoyo, así como los pernos de anclaje que los fijan al suelo o estructura portante, deberán estar dimensionados para que resistan cada una de las condiciones de carga posible del recipiente.

Los dispositivos de apoyo para recipientes verticales pueden ser :

- Patas : El recipiente se apoya en 3 ó 4 patas soldadas a la carcasa, cada pata esta fijada al suelo por un perno de anclaje que resiste las cargas de tracción. La sujeción por medio de patas se utiliza en recipientes de altura no superior a 5 m y diámetro no superior a 2.4 m.

- Faldón cilíndrico o cónico : Se utiliza en los recipientes que no pueden ser soportados por patas, bien sea, por su tamaño o por tener que transmitir esfuerzos grandes. Consiste en un cilindro soldado al fondo. Con este tipo de apoyo la carga se reparte uniformemente a lo largo del perímetro de la circunferencia de soldadura, evitando concentraciones de esfuerzos en la envolvente y disminuyendo la presión transmitida al suelo. Los pernos de anclaje se sitúan a lo largo del perímetro de la circunferencia de apoyo a una diferencia entre 400 y 600 mm. El número de pernos deberá ser múltiplo de 4.

- Ménsulas : Es utilizado en los recipientes verticales que deberán soportarse en estructuras portantes cuando las dimensiones y cargas no son muy grandes. El número de ménsulas utilizado son de 2, 4, 8 y múltiplos de 4.

Los recipientes horizontales se apoyan en el suelo o en la estructura portante por medio de cunas, que pueden ser de acero o de cemento. El número de cunas es normalmente de 2.(2),(30)

#### c) CONEXIONES

Todo recipiente debe tener como mínimo una conexión de entrada del fluido y otra de salida, aunque siempre tienen muchas más.

Servicios más comunes :

- De entrada y salida del fluido.
- Para instrumentos como ; manómetros, indicadores o reguladores de nivel.
- Para válvulas de seguridad.
- Para servicios tales como drenaje, venteo, de limpieza.(7)

#### d) ACCESORIOS

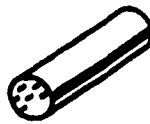
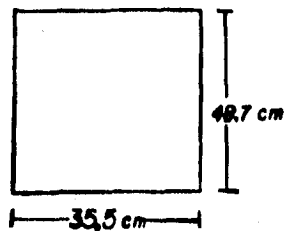
Que se decidirán una vez construyendo el equipo.(9)

Obj. 1.2

### Construcción

Se seleccionó la forma cilíndrica con un diámetro de 6 pulgadas (como el mínimo recomendado por este tipo de celdas).

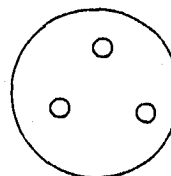
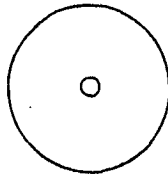
1.- Rolando una placa de acero inoxidable 3/16 de pulgada de espesor esto es considerando que los esfuerzos son constantes a través del espesor de la pared del recipiente, utilizando soldadura de acero inoxidable empleando un arco eléctrico para darle la forma deseada ver figura sig.



Diseño del recipiente cilíndrico mostrando las líneas de esfuerzo originadas por la presión interna.

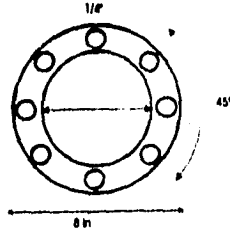
2.- De este cilindro se sacaron los componentes del cuerpo de la celda efectuando un corte a 45 cm. para mantener una relación de diámetro a altura de 3:1 recomendada en tanque de baja presión como es el caso.(30)

3.- Las cubiertas del recipiente fueron del mismo calibre que el cuerpo de la celda y de forma plana soldándose al cuerpo cilíndrico con el mismo tipo y sistema de soldadura.

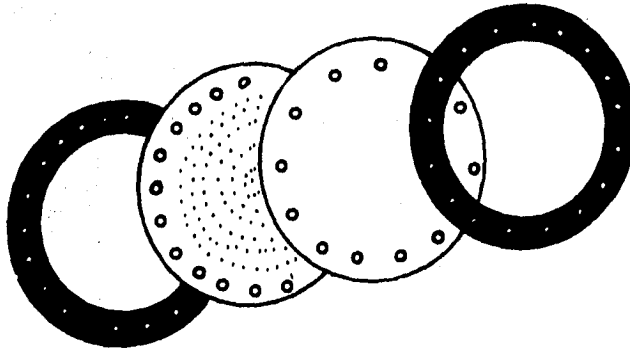


4.- Para las toberas de entrada de suspensión, aire a presión, salida del filtrado, y para la colocación de los instrumentos de medición se utilizaron coples de tubería que se recomiendan para medidas de una pulgada o menores.

La unión de ambos cuerpos de la celda se efectuó por medio de bridas de 1/4 de pulgada, soldadas a los cilindros con un diámetro externo de 8 pulgadas.



5.- El soporte del medio filtrante se construyó utilizando una placa de acero inoxidable de 8 pulgadas de diámetro, la cual fue perforada en los vértices de una cuadrícula dibujada en su superficie con una broca de 3/16 de pulgada para mantener una área abierta lo más extensa posible sin influir en la resistencia a la filtración.



Por otro lado el soporte de la celda que permitirá las cargas a las que será sometido el recipiente hacia el suelo se dimensionaron para que resistieran todas y cada una de las condiciones de carga posibles como pueden ser : el peso propio, peso de la suspensión en operación normal, peso del agua en la prueba hidráulica, peso de accesorios internos y externos.(30)

La celda terminada y con sus especificaciones se muestra en la fig 6

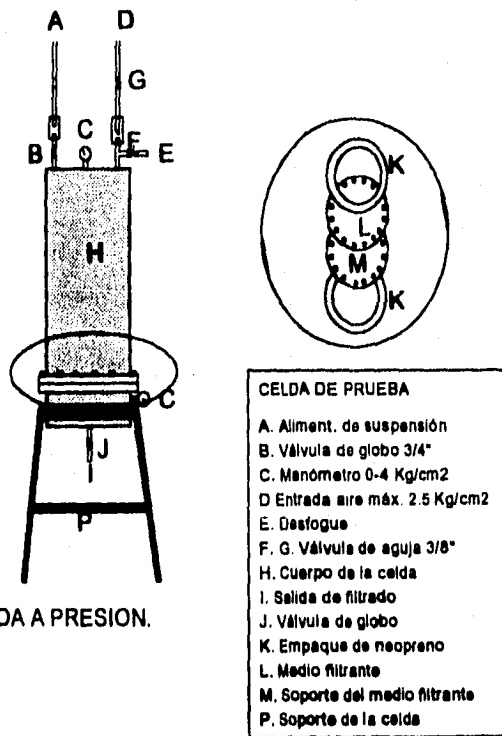


Figura 6 : CELDA A PRESION.

Debido a la naturaleza de los materiales a ser utilizados durante las pruebas de filtración, se adaptó un tanque mezclador a la celda para completar el sistema ; este tanque tiene la finalidad de evitar que dentro de la celda se presenten acumulaciones de suspensión lo cual tendría como consecuencia que se presentara la sedimentación, lo que acarrearía el obtener datos falsos o no valederos para los fines que se persiguen.(11)

El tanque mezclador consta de un motor de 1/4 Hp, que sirve para agitar su propela, va conectado a un variador electrónico de velocidad para motor de C. D. en el cual se puede variar hasta 1000 rpm., cuyo amperaje máximo es de 6.5 amp. y 127 volts de entrada y 90 volts y 5.35 amp. de salida y su capacidad es de 12 litros.

La capacidad de la celda es de 4 litros, el área donde recibe la torta es de 6 pulgadas y sus dimensiones se muestran en la fig. 7.

### CELDA DE PRESION

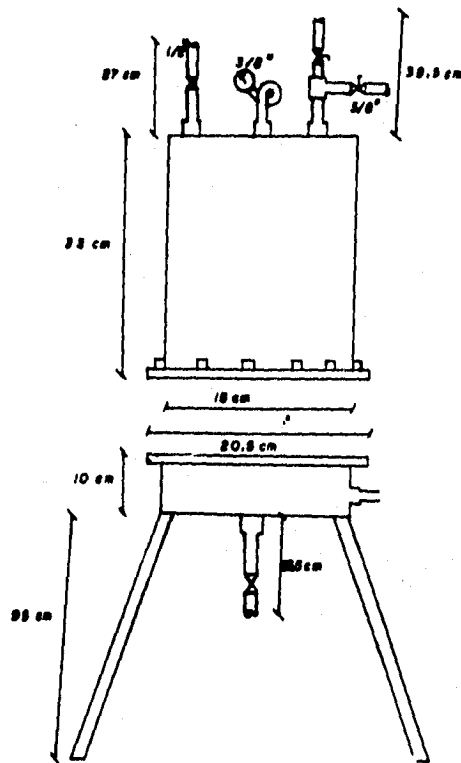


Figura 7 : DIMENSIONES DE LA CELDA

Por lo tanto el diagrama completo del sistema se muestra en la fig 8.

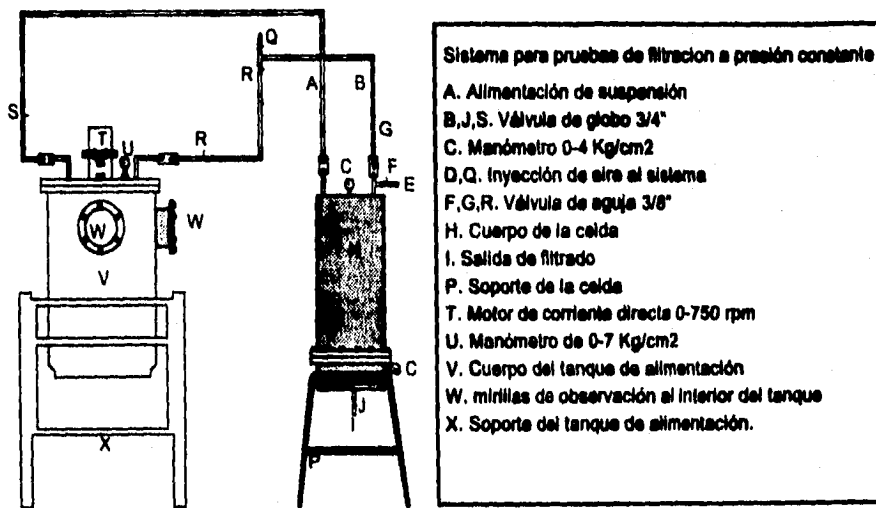


Figura 8 : Diagrama del sistema completo para pruebas de filtración intermitente a caída de presión constante.



**ETAPA III (EXPERIMENTAL)**

**VALIDACION DEL SISTEMA**

**PRUEBA DE FILTRACIÓN INTERMITENTE**

**(CELDA A PRESIÓN) NIVEL LABORATORIO**

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Objetivo particular 2 :

Obj. 2.1

La caracterización del sistema se efectuó de acuerdo a la necesidad de conocer perfectamente el funcionamiento de la celda de presión y así tener un control más efectivo del sistema, para lo cual se realizaron tres actividades.

Actividad 1 : Se tomaron dimensiones conocidas y dispositivos de apoyo conocidos anteriormente.

Actividad 2 : Se hizo una prueba hidráulica para detectar posibles fugas, llenando el sistema con agua a diferentes presiones 0.5, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5  $Kg_f/cm^2$ . Se puso de manifiesto que a presiones mayores de  $3Kg/cm^2$ , se presenta un goteo en la celda de filtración, en la zona de unión de las bridas, con esto se concluye que no se debe manejar a mayores presiones.

Actividad 3 : Se realizó una prueba de proceso con depósito de sólidos (tierras diatomeas) para observar la formación de la torta.

### \* Consideraciones

El espesor de la torta está en función de la concentración de la suspensión a filtrar (kg tierra de diatomeas en 4L de suspensión).

Bibliográficamente se sabe que para un área de filtración de  $100\text{ ft}^2$  se obtiene un espesor de torta de  $1/16\text{ in.}$  al utilizar entre 10 y 15 kg de ayuda filtro. (19)

Debido a que el filtro prensa al cual se va a escalar posteriormente tiene como límite máximo  $1/2\text{ in.}$  para la formación de la torta se propone manejar espesores menores a éste, tales como  $1/4$  y  $1/8$  de pulgada.

Primeramente la experimentación se encaminará a comprobar la relación bibliográfica que se propone cuantificando el espesor de  $1/2\text{ in.}$  y con ello aceptar dicha relación o proponer la obtenida. Posteriormente se verificará si la relación resultante se cumple para los espesores de  $1/4$ ,  $1/8$  y  $1/16\text{ in.}$

### \* Hipótesis de trabajo

1) El espesor de la torta formada durante el proceso de filtración es directamente proporcional a la cantidad de sólidos en suspensión a filtrar e independiente del ( $-\Delta P$ ) manejado durante el mismo.

**CALCULOS :**

**X = Cantidad de sólidos en suspensión.**

**H = Humedad final de la torta.**

**VARIABLES.**

**Independiente : Cantidad de sólidos en suspensión.**

**Dependiente : Espesor de la torta.**

**A controlar : Presión para cada experimento.**

- Cálculo teórico de las concentraciones.

$\phi$  celda = 6 in.                      r = 3 in = 0.762 m

A celda =  $\pi r^2 = \pi(0.25 \text{ ft})^2 = 0.762 \text{ m}$

10 Kg sólidos  $\rightarrow$  100 ft<sup>2</sup> de área  $\rightarrow$  1/6 in de espesor.

100 ft<sup>2</sup> = 9.29 m<sup>2</sup>

100 Kg de sólidos  $\rightarrow$  9.29 m<sup>2</sup> área 1/16 in de espesor.

Por lo tanto para obtener 1/16 in de espesor en la celda

10Kg  $\rightarrow$  9.29 m

X<sub>1</sub>  $\rightarrow$  0.01824 m

X<sub>1</sub> = 0.0195 Kg para 1/16 in de espesor.

Para 1/4 in de espesor siguiendo el mismo procedimiento tenemos X<sub>2</sub> = 0.078

Kg de tierra diatomea.

Considerando el promedio de los rangos en gramos se calcula la concentración a 4000 ml de suspensión.

1/2 in ..... 4.9%

1/4 in ..... 2.4%

1/8 in ..... 1.2%

- Rango de la variables.

1) Cantidad de sólidos en suspensión : 196, 97.75 y 48.6 Kg.

2) Presión : 0.3 - 2.5Kgf/cm<sup>2</sup>

Se preparo una suspensión en 12,000 ml de agua .

Como la relación no se cumple se obtuvo la nueva relación.

Condiciones

$-\Delta P = 1 \text{ Kg/cm}^2$

S = Kg. de solidos

Area = 6 in

Repeticiones 7

Volumen : 12 litros

$\bar{X}$ S (Kg. de solidos)	$\bar{X}$ ESPESOR (in)
0.08	1/2
0.04	1/4
0.02	1/8

Con los resultados de esta tabla concluimos que la cantidad de sólidos a depositar, es directamente proporcional al espesor y obtuvimos la cantidad para un espesor dado de torta y una área de 6 in.

Con estos datos verificamos los rangos de operación de la presión que a continuación se presenta en la tabla

$\bar{X}$ S (Kg. de solidos)	$\bar{X}$ ESPESOR (in)	$\bar{X}$ PRESIONES (Kg/cm <sup>2</sup> )
0.08	1/2	.5
		1.5
0.04	1/4	2.0
		2.5
0.02	1/8	3.0

Se realizaron con los diferentes espesores pruebas a todas las presiones.

- Hipótesis de trabajo :

1) La relación existente entre el tiempo y el volumen final se rige por un comportamiento parabólico y es inversa a la presión.

- Variables

Independiente : Tiempo

Dependiente : Volumen

A controlar : Presión y concentración

De respuesta : Velocidad de filtración

## MANUAL DE OPERACION DEL SISTEMA PRUEBA (\*)

- 1.- Llenar el tanque mezclador con suspensión, cerrarlo y encender el motor para que agite a la propela a una velocidad de 20 rpm.
- 2.- Armar la celda de abajo hacia arriba
  - a) Colocar la base
  - b) Sobre la base empaque
  - c) Placa perforada
  - d) Medio filtrante
  - e) Empaque
  - f) Cuerpo de la celda
  - g) Asegurar la celda cerrándola por medio de sus bridas.
- 3.- Conectar las mangueras : de el tanque de alimentación a la celda, por las vías de alimentación, conector del aire de la línea de alimentación al tanque mezclador y otra de la línea de aire a la celda de presión.
- 4.- Cerrar las válvulas de alimentación y de carga de la celda.
- 5.- Abrir la válvula de paso de aire al tanque mezclador, regulándolo con la válvula abierta a la atmósfera a la presión que se requiera sin que se sobrepase  $2 \text{ Kg / cm}^2$ .
- 6.- Abrir simultáneamente la válvula del tanque mezclador que alimenta a la celda y la que la recibe en la celda, abrir al máximo.
- 7.- Abrir las dos válvulas que regulan la presión de la celda y mantener la presión deseada procurando que durante todo el proceso la presión del tanque mezclador sea mayor de  $0.2 \rightarrow 0.6 \text{ Kg / cm}^2$ .
- 8.- Abrir la válvula localizada bajo el cuerpo de la celda y empezar a cuantificar volúmenes, al finalizar la filtración detener el registro del tiempo.
- 9.- Cerrar la válvula de alimentación del tanque mezclador 500 ml antes de alcanzar el volumen deseado, para evitar la acumulación y tortas demasiado húmedas.
- 10.- Cerrar todas las válvulas conectadas a la línea de aire.
- 11.- Desarmar la celda y retirar bridas.
- 12.- Levantar el cuerpo de la celda y retirar la torta teniendo cuidado de no romperla, junto con el medio filtrante y la placa perforada. (soporte del medio)
- 13.- Hacer mediciones oportunas a la torta.
- 14.- Cuantificar el tiempo muerto (desmontado, lavado y montado de la celda).

\* Nota : La operación se basa en la fig( 8 ).

- 15.- Lavar la celda y accesorios (medio filtrante, empaques, soporte).
- 16.- Recurrir al paso 2 y continuar con la experimentación.
- 17.- Al finalizar la experimentación del día, lavar todo, incluyendo el tanque mezclador, desconectar mangueras y apagar motor.

**Las condiciones de operación son :**

- 1.- Presión mínima a operar  $0.4 \text{ Kg/cm}^2$  y máxima de  $2.0 \text{ Kg/cm}^2$ , a estas presiones se forman tortas uniformes y se puede cuantificar el tiempo sin problemas.
- 2.- La presión del tanque debe ser  $0.2 \text{ Kg/cm}^2$  a  $0.6 \text{ Kg/cm}^2$  mayor que la presión en la celda, con esto se evita la acumulación ya que si es mayor, la suspensión se alimenta muy rápido, produciendo acumulación y tortas irregulares. Si la presión es igual con la celda, no se llevaría a cabo la alimentación del tanque a la celda.
- 3.- Cuando se lleve a cabo el proceso de filtración, el cerrado al terminar la operación, va a depender de las presiones y de los volúmenes que se estén manejando, para que nos se derrame el filtrado y para evitar tortas demasiado húmedas, el operario tendrá que encontrar esa relación según su presión y su suspensión problema.
- 4.- Para el secado de la torta al término de la filtración se va disminuyendo la alimentación del aire durante 1/2 minuto.
- 5.- El tanque de alimentación debe trabajar a 20 rpm. como máximo en la agitación y a una capacidad de 12 litros.
- 6.- Para manejar el equipo es necesario ver el manual de operación.

## RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Obj. 2.2

Determinar la influencia de la presión y espesor de la torta sobre la velocidad de filtración en el sistema prueba.

Actividad 1 : Calculo para obtener  $\bar{V}$

$\Delta V$  y  $\bar{V}$

Ejemplo :

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

$$\Delta V_1 = 0.5 \times 10^{-1} - 0 = 0.5 \times 10^{-1}$$

$$\Delta V_2 = 1.0 \times 10^{-1} - 0.5 \times 10^{-1} = 0.5 \times 10^{-1}$$

$$\bar{V} = \frac{V_2 + V_1}{2}$$

Ejemplo :

$$\bar{V} = \frac{0.5 \times 10^{-1} + 0}{2} = 0.25 \times 10^{-1}$$

$$\bar{V} = \frac{1.0 \times 10^{-1} + 0.5 \times 10^{-1}}{2} = 0.75 \times 10^{-1}$$

		$\Delta\theta/\Delta V$ (seg/m <sup>3</sup> )						
$\bar{V}$ (m <sup>3</sup> ) $\times 10^6$	1	2	3	4	5	6	7	
0.25	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	
0.75	6000	4000	6000	8000	6000	4000	6000	
1.25	10000	8000	6000	10000	8000	10000	6000	
1.75	16000	14000	14000	16000	14000	10000	10000	
2.25	18000	14000	14000	16000	12000	12000	14000	
2.75	24000	18000	16000	18000	16000	14000	14000	
3.25	24000	16000	20000	18000	20000	14000	14000	
3.75	20000	32000	18000	14000	22000	20000	18000	

$$-\Delta P = 49059 \text{ Pa}$$

$$E = 1/2 \ln$$

$$X = 0.08 \text{ Kg}$$

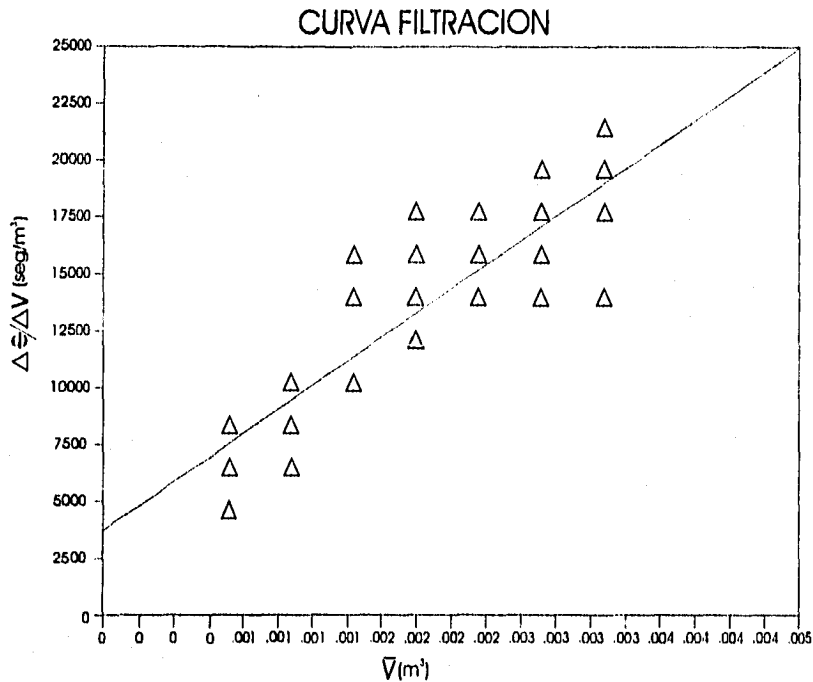
$$C = 20 \text{ Kg sol / m}^3 \text{ filtrado}$$

$$K_p = 4180422.265 \text{ s/m}^6$$

$$\alpha = 3.37 \times 10^9 \text{ m/kg}$$

$$B = 3.997.120 \text{ s/m}^3$$

$$R_m = 3.55 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$



**CONCLUSIONES :**

- La relación entre el volumen del filtrado y el tiempo de filtrado, se rige por un comportamiento parabólico(visto antes de linealizar la gráfica).
- La relación entre el tiempo para alcanzar un volumen fijo de filtrado es inversa a la presión.
- El tiempo para alcanzar un volumen de filtrado, es proporcional (aumenta) a los Kg. de sólidos.
- Se comprobó que la velocidad de filtrado, es directa al (-ΔP), y es inversa al espesor.
- Se realizó un análisis de varianza múltiple para determinar la influencia del ΔP sobre el espesor en función de los sólidos en suspensión.
- Se comprobó que los datos son repetibles, reproducibles, lineales y exactos.(3, 10, 13, 11, 16, 20, 38, 39)



### Obj. 2.3

Obtener los valores de las constantes de filtración ( $\alpha$ ,  $R_m$ ,  $S$ ) del sistema prueba.

Actividad 1 : Desarrollo del proceso de filtración para la obtención de datos experimentales que servirán para el establecimiento de las gráficas y relaciones base para el escalamiento.

Es necesario evaluar las constantes  $\alpha$  y  $R_m$  (resistencias), ya que son características para cada concentración, tipo de medio filtrante y  $(-\Delta P)$ .

La evaluación del tiempo es necesaria, ya que de esta forma se establecen las mejores condiciones de filtración que arrojaran buenas eficiencias, capacidades y características de operación.

#### \*Hipótesis del trabajo

1) la variación de la velocidad final es directa con respecto a  $(-\Delta P)$  a la cual se someta el sistema.

2) El volumen final guarda una relación inversa a la concentración experimentada.

#### \* Variables

Independiente : Tiempo

Dependiente : Volumen

A controlar : Concentración y presión.

Respuesta :  $\alpha$  y  $R_m$ .

En las siguientes tablas se reporta la relación de volúmenes contra tiempo a diferentes espesores (1/4 in, 1/8 in, 1/2 in) y a diferentes  $(-\Delta P = , 0.5, 0.7, 1.0, 1.7, 2.0)$ , las  $(\bar{x}_i)$  son las medias de los tres eventos tomados de los tiempos; y  $(V_f)$  es la velocidad final  $(\bar{\theta}_d)$ , y  $(\bar{\theta}_d)$  es el tiempo muerto o de descarga que se empleó en lavado y montaje del equipo).

El volumen de filtrado  $V_f = \frac{V_f \text{ final}}{\theta \text{ final}} \cdot \bar{\theta}_d = V_f = \text{velocidad de filtración al obtener}$

$$4 \text{ lts.} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

TABLA No. 1 VOLUMENES CONTRA TIEMPO  
ESPESOR 1/8 in.

$(-\Delta P)(\text{Kg/cm}^2)$	0.5	0.7	1.0	1.7	2.0
VOLUMEN ( $\text{m}^3$ )	TIEMPO (seg.)				
$\times 10^3$	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\bar{x}_4$	$\bar{x}_5$
0.5	5.5	3.0	3.0	2.0	3.0
1.0	7.4	5.0	5.0	3.0	4.0
1.5	9.8	6.0	7.0	4.4	5.0
2.0	12.6	7.6	10.5	5.5	6.0
2.5	17.1	9.5	12.5	6.0	7.0
3.0	19.2	11.5	14.5	7.0	8.0
3.5	23.7	13.0	17.0	8.3	9.0
4.0	26.6	15.5	19.5	10.5	10.6
$\bar{\theta}_d$ prom. (seg.)	383.3	444.0	517.0	447.5	674.0
$V_f(\text{m}^3/\text{seg})$ $\times 10^4$	1.503	2.580	2.051	3.809	3.773

$\bar{\theta}_d = 6 \text{ minutos} = 360 \text{ segundos}$

TABLA No. 2 VOLUMENES CONTRA TIEMPO  
 ESPESOR 1/4 in.

(-AP)(Kg/cm <sup>2</sup> )	0.5	0.7	1.0	1.7	2.0
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	TIEMPO (seg.)				
x 10 <sup>3</sup>	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\bar{x}_4$	$\bar{x}_5$
0.5	5.0	2.4	2.0	2.0	3.0
1.0	8.4	5.0	4.0	3.5	4.0
1.5	10.5	8.0	6.0	4.5	6.0
2.0	14.5	11.0	7.4	6.0	7.0
2.5	18.2	15.0	10.6	7.5	8.3
3.0	22.6	18.0	13.4	8.8	9.3
3.5	27.6	22.0	16.4	10.8	10.0
4.0	33.8	26.0	19.6	14.0	12.3
$\theta_f$ prom. (seg.)	341.0	556.0	444.0	444.0	561.5
$V_f$ (m <sup>3</sup> /seg) x 10 <sup>-4</sup>	1.183	1.538	2.040	2.040	3.252

$\theta_d = 6$  minutos = 360 segundos

TABLA No. 3 VOLUMENES CONTRA TIEMPO  
 ESPESOR 1/2 in.

$(-\Delta P)(kg/cm^2)$	0.5	0.7	1.0	1.7	2.0
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	TIEMPO (seg.)				
$\times 10^4$	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{x}_3$	$\bar{x}_4$	$\bar{x}_5$
0.5	5.3	3.0	2.6	4.0	3.3
1.0	8.5	6.0	5.0	5.8	4.6
1.5	12.6	10.0	7.4	8.0	6.0
2.0	20.5	15.0	11.4	9.6	7.3
2.5	26.1	22.0	15.0	12.2	9.6
3.0	34.1	28.0	19.0	14.0	11.6
3.5	42.6	35.0	24.0	17.1	19.0
4.0	52.0	44.0	28.5	19.0	16.6
$\theta_f$ prom. (seg.)	434.6	576.0	481.5	366.0	597.0
$V_f(m^3/seg)$ $\times 10^4$	0.77	1.40	1.40	2.10	2.60

$\theta_d = 6 \text{ minutos} = 360 \text{ segundos}$

SE PROCEDIO A GRAFICAR EL VOLUMEN CONTRA TIEMPO

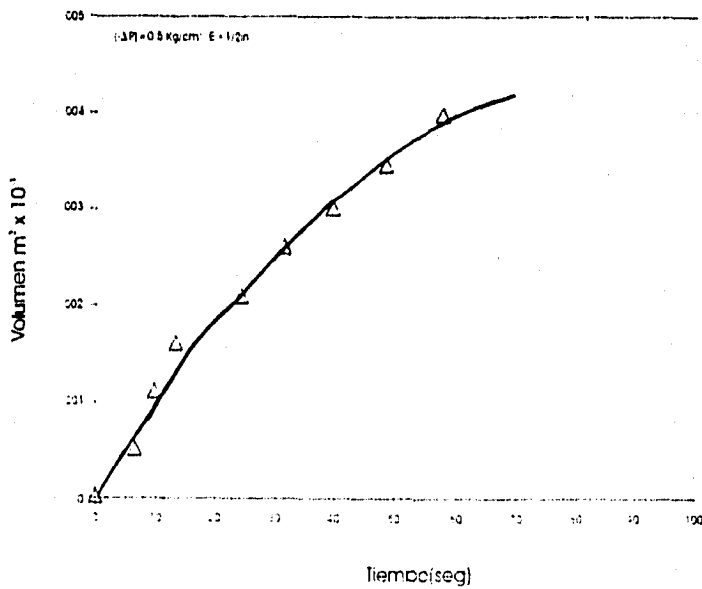
Por ejemplo : a continuación se toma la columna de volumen y la primera columna de tiempo ( $\bar{x}_1$ ) a las condiciones  $-\Delta P = 0.5 kg/cm^2$ , Espesor 1/2 in.

VOLUMEN(m <sup>3</sup> ) X 10 <sup>3</sup>	TIEMPO(seg.)
0.5	5.3
1.0	8.6
1.5	12.6
2.0	20.6
2.5	26.1
3.0	39.1
3.5	42.6
4.0	62.0
Q / prom. (seg.)	363.3
V(m <sup>3</sup> /seg) X 10 <sup>3</sup>	1.503

-ΔP = 0.5Kg/cm<sup>2</sup>  
Espesor 1/2 in

Su grafica

Volumen/tiempo



## CONCLUSIONES

Después de realizar un análisis de varianza se concluye que los datos son reproducibles dadas las características y los múltiples factores que intervienen en la operación por que el 85% de los datos en la mayoría de los eventos no tiene coeficientes de variación mayores del 5%.

-Se realizó una ANOVA que permitió ver que la variación de repeticiones debido a errores experimentales o del operador mostró un 3% de error como promedio, lo cual nos permite concluir que son repetibles los datos.

- La exactitud no es posible determinarla ya que no se conocen valores reales de un equipo igual y bajo las mismas condiciones de operación a las que se trabajo.

- Precisión : medida que se da con el conjunto de repetibilidad y reproducibilidad agrupados, por lo tanto en este evento podemos concluir que los datos son precisos.

- La relación entre el volumen final y el tiempo final se rige por un comportamiento parabólico como se esperaba.

- el  $-\Delta P$ , no tiene ninguna influencia en la formación del espesor, más bien es la cantidad de sólidos en suspensión la que determina dicho espesor.

- Se comprobó que la relación entre el tiempo final para alcanzar un volumen de filtrado dado es directamente proporcional al  $-\Delta P$ , e inversa al espesor.

Actividad 2 : Se obtienen los valores de  $\alpha$  y  $R_m$  a partir de  $k_p$  y  $B$ .

Cálculo de  $\alpha$

$$k_p = \frac{\alpha MC}{A^2 (-\Delta P) g_c}$$

$$\alpha = \frac{k_p A^2 (-\Delta P) g_c}{MC}$$

Cálculo de  $R_m$

$$B = \frac{R_m M}{A (-\Delta P) g_c}$$

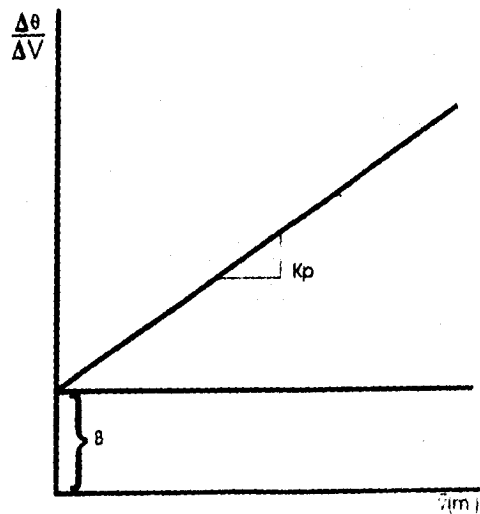
$$R_m = \frac{AB (-\Delta P) g_c}{M}$$

$$A = 0.0182 m^2$$

$$g_c = 1 \text{ kgm} / \text{Ns}^2$$

$$MH_2O = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{seg}$$

Se construyeron los graficos  $\Delta\theta/\Delta V$  contra volumen,



Mediante una regresión lineal. Los valores de Kp y B y a partir de estas se calcularon  $\alpha$  y Rm respectivamente, y se llenó la sig. tabla.

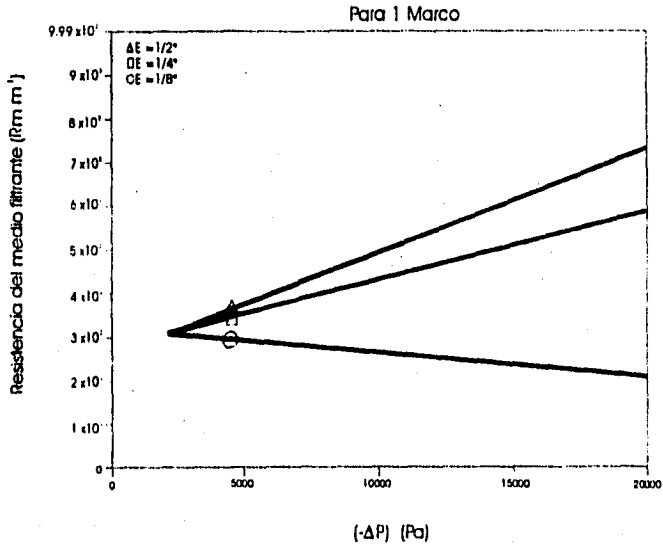
TABLA No. 4

CUADRO GENERAL CELDA

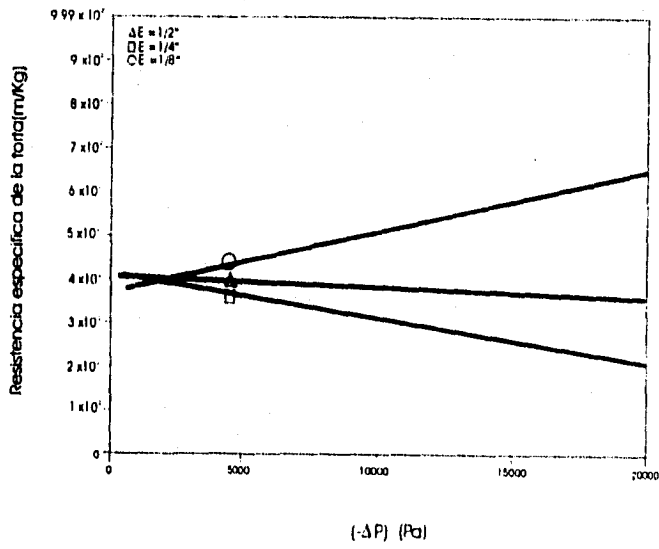
r	(-AP) (Kg/cm <sup>2</sup> )	E (m)	Kp (s/m <sup>2</sup> )	B (s/m <sup>2</sup> )	$\alpha \times 10^3$ m <sup>2</sup> /g	Rm $\times 10^3$ (m <sup>2</sup> )
0.8736 0.8521 0.8304	0.5	1/2 1/4 1/8	4180422.26 2033428.45 1428571.42	3997.12 3878.10 3214.28	3.37 3.28 4.61	3.55 3.44 2.85
0.8736 0.8521 0.8304	0.7	1/2 1/4 1/8	3520612.30 1392712.55 328767.12	2836.50 3773.27 3636.43	3.98 3.15 1.48	3.52 3.69 4.49
0.8736 0.8521 0.8304	10	1/2 1/4 1/8	2339369.55 1139080.29 916311.27	2311.87 2286.73 1647.78	3.78 3.68 5.92	4.10 4.06 2.92
0.8736 0.8521 0.8304	20	1/2 1/4 1/8	952380.95 142857.14 428571.42	1666.66 2280.0 1321.42	3.07 0.92 5.54	5.92 7.99 4.69



Grafica de resistencia de medio filtrante ( $R_m \text{ m}^{-1}$ ) vs  $\Delta P$

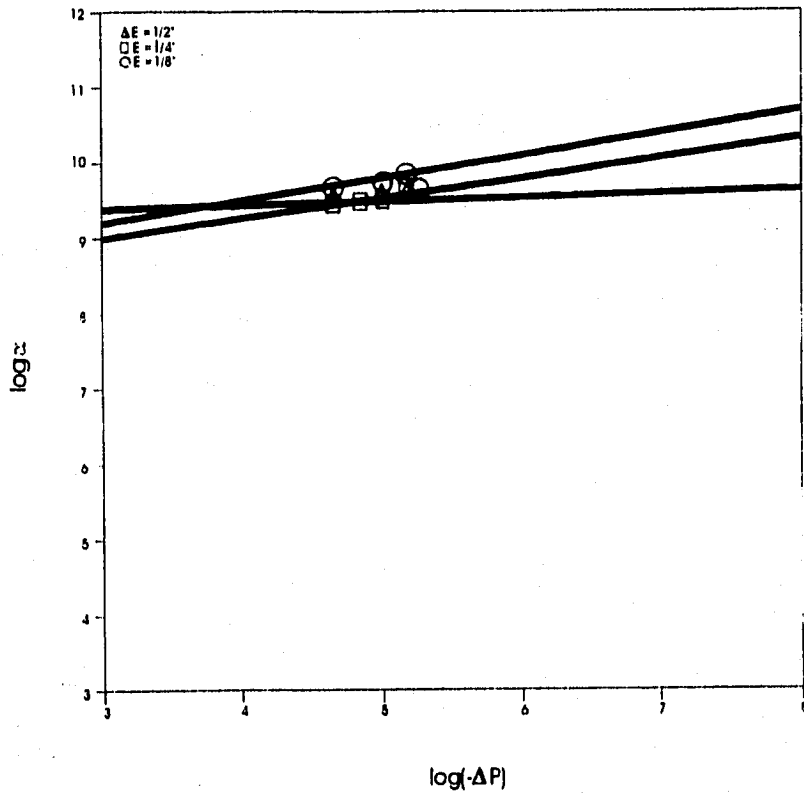


Grafica de resistencia especifica de la torta vs  $-\Delta P$



Actividad 3 : Cálculo de S (compresibilidad de la torta)

Grafica de  $\log \alpha$  vs  $\log(-\Delta P)$



La determinación del coeficiente de compresibilidad se determinó con el propósito de conocer la variación de la resistencia de la torta con respecto a la presión.

Grafica de log  $\alpha$  vs log(- $\Delta P$ )

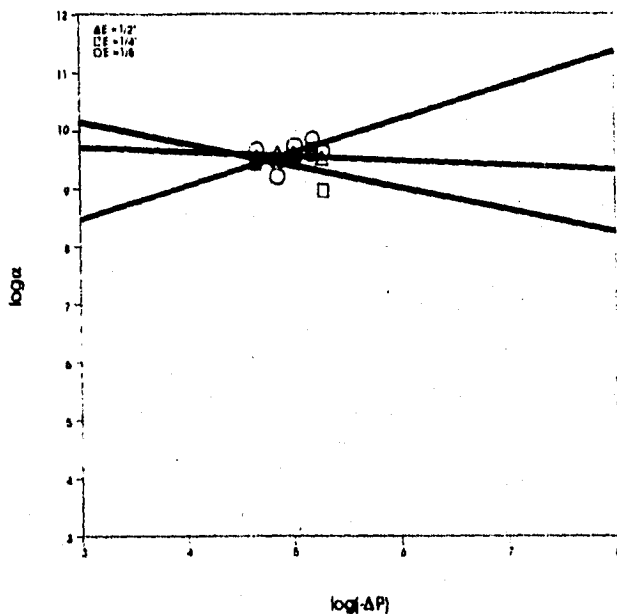


TABLA No. 5  
VALORES  
TABULACION

log(- $\Delta P$ )	log $\alpha$		
	1/2	1/4	1/8
4.6907	9.5276	9.5158	9.6637
4.8368	*9.5998	9.4983	*9.1702
4.9917	9.5774	9.5658	9.7723
5.2221	9.5463	9.6651	9.8920
5.2927	*9.4871	*8.9637	9.7435

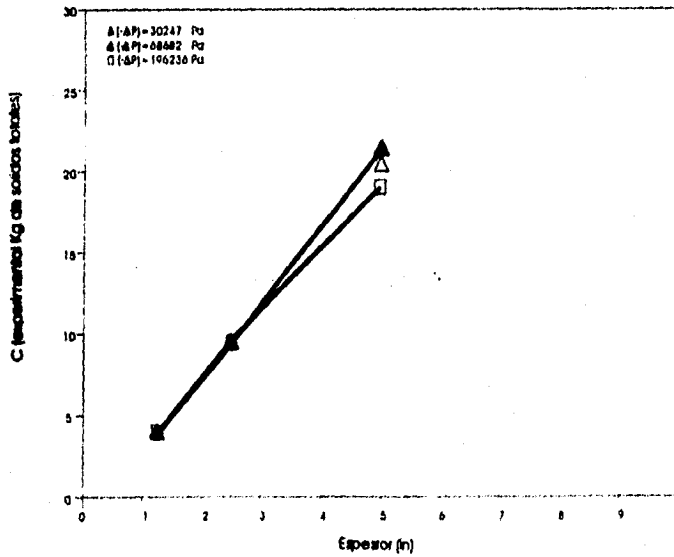
\* DATOS ELIMINADOS

Actividad 5 : Calcular el valor teórico de C ,  $C = m/v$  y el experimental y compararlos, se hizo para cada una de las concentraciones trabajadas a partir de los volúmenes promedio obtenidos y los pesos totales promedio de sólidos retenidos y sirvió para determinar la eficiencia.

**TABLA No. 6**  
Valores teórico y experimental de C

E	VALOR TEORICO	VALOR EXPERIMENTAL
1/2"	20.0	21.1
1/4"	10.0	9.5
1/8"	5.0	4.7

Grafica de C (experimental)



Actividad 6 : Determinar la capacidad y eficiencia de filtrado.

Dado que la capacidad se define como el coeficiente entre el volumen a filtrar y el tiempo del ciclo de filtración.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{volumen filtrado}}{\theta_c A}$$

$\theta_c$  = Ciclo de filtración

$$\theta_c = \theta_f + \theta_d + \theta_l$$

$\theta_c$  = Ciclo de filtración

$\theta_d$  = Tiempo de descarga

$\theta_l$  = Tiempo de lavado

Como el tiempo de lavado no se efectúa en el equipo y el tiempo de descarga se considera no mayor de 5 minutos, el área de la celda es constante  $0.0762\text{m}^2$  la ecuación se reduce.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{volumen filtrado}}{A}$$

Entonces esta evaluación se realiza en función de las diferentes presiones, al calcular las velocidades finales de cada una de ellas, y estas estarán divididas entre la misma constante que en este caso es el área por lo que no tiene objeto de ser el cálculo.

Para la eficiencia

$$\eta = \frac{\text{masa de sólidos retenidos en la torta}}{\text{masa de sólidos adicionados a la suspensión}}$$

En este caso la evaluación se hizo experimental y fue del 100% según el cálculo de humedad de la torta, porque se obtuvo en la torta la misma cantidad de sólidos que se depositaron en la suspensión problema (cálculo de C).

## CONCLUSIONES DE LA CELDA A PRESIÓN

- La relación entre  $\alpha$  con  $(-\Delta P)$  es proporcional sin embargo existen algunas desviaciones.
- Los valores de  $\alpha$  y  $R_m$  siguen una tendencia proporcional a  $(-\Delta P)$ .
- El valor de  $\alpha$  es inverso a  $C$  cumpliéndose así la relación teórica.
- La eficiencia de retención de sólidos fue del 100% de acuerdo al cálculo de  $C$  teórico comparado con el experimental por el método de humedad y con la aplicación del análisis de varianza simple.
- Se realizaron análisis de varianza simple y análisis de varianza múltiple y regresión lineal múltiple para comprobar que los datos fueran reproducibles, repetibles, exactos y con un intervalo de confianza del 95%, se comprobó que los datos son lineales y sólo son totalmente precisos en la actividad 4, 5 y 6 (humedad y eficiencia de sólidos retenidos). (3, 10, 11, 13, 16, 20, 38, 39)
- Exactitud : No es posible determinarla ya que no se conocen valores reales de un equipo igual y bajo las mismas condiciones de operación a las que se trabajó.
- Precisión :
  - Reproducibilidad (expresión de la dispersión entre eventos sucesivos). Dadas las características y múltiples factores que intervienen en la filtración aún con el más estricto control de la presión se puede considerar que el equipo opera con reproducibilidad, ya que sólo el 25% de los datos en la mayoría de los eventos no tiene un coeficiente de variación superior a 5%.
  - Repetibilidad. La variación del conjunto de repeticiones de un evento debido a errores experimentales o de operador, no muestra un porcentaje de error superior al 5%, lo cual nos permite concluir que existe repetibilidad (ANOVA).
  - Linealidad. Debido a las características de la suspensión a filtrar los resultados obtenidos no son proporcionales (lineales), por lo cual se hace una transformación con los logaritmos y se gráfica ( $\log V$  vs  $\log t$ ).
- A partir de lo anterior, y haciendo hincapié en lo compleja que es la operación, concluimos que el equipo proporciona resultados confiables.
- La relación de la cantidad de sólidos para obtener un espesor dado de torta, se cumplió y por lo tanto se utilizó en toda la experimentación en celda, la relación entre  $V_f$  y el  $\theta_f$ , se rige por un comportamiento parabólico como se esperaba.
- Se comprobó que la velocidad de filtrado es directa al  $-\Delta P$  e inversa al espesor.
- Se comprobó que la relación entre  $\alpha$  y el  $-\Delta P$  es directa.
- Los valores de  $\alpha$  y  $R_m$  siguen una tendencia directa al  $-\Delta P$ .

- El comportamiento de  $R_m$  con respecto al espesor tiene una tendencia directa.
- El valor de  $\alpha$  es inverso a  $C$ , cumpliéndose así la relación teórica.
- La humedad obtenida en la torta fue tal que permitió obtener un valor de  $C$  experimental similar al teórico.
- El análisis de la validación me permite confiar en los datos de la celda, y por lo tanto utilizarlos para un escalamiento ya planteado y finalmente emplearlo para experimentar el filtro prensa.
- A continuación se realiza el escalamiento.

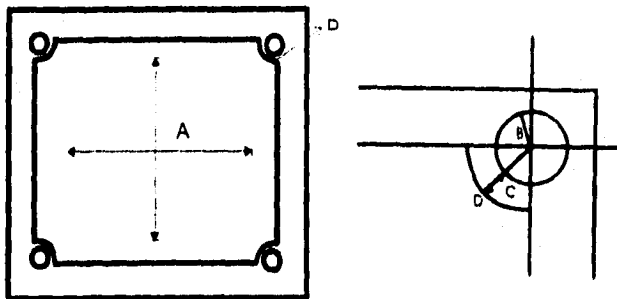
## CARACTERIZACIÓN Y MANUAL DE OPERACIÓN DEL FILTRO PRESA

Objetivo particular 3 :

Obj. 3.1 :

Caracterización del filtro prensa :

Se determinó el área real de filtración por placa



Donde :

$$A = 0.158 \text{ m}$$

$$B = 0.017 \text{ m}$$

$$C = 0.009 \text{ m}$$

$$D = 0.04 \text{ m}$$

El área del marco es igual a :

$$At = 2[ A \text{ cuadro} - [4 [A \text{ círculos} + 4 (A \text{ banda}) ] ]$$

Donde :



**ETAPA IV**

**ESCALAMIENTO**

**A NIVEL PLANTA PILOTO**

## MANUAL DE OPERACION DEL FILTRO PRESA

### a) MONTAJE :

1.- Conectar la manguera con geometría en Y para unir las tuberías de tanque de suspensión y de agua con la alimentación del filtro.

2.- Conectar la manguera de recirculación (tubería en la cual se encuentra montado el manómetro).

3.- Conectar el agitador a la alimentación del aire e introducirlo al tanque que contendrá la suspensión.

4.- Llenar los tanques de alimentación con agua, con la cantidad necesaria para lavar el filtro prensa y para preparar la suspensión respectivamente.

5.- Añadir la cantidad de sólidos requeridos al tanque para preparar la suspensión.

6.- Abrir la válvula de alimentación del aire con la finalidad de originar una agitación para homogeneizar la suspensión.

7.- Colocar el medio filtrante (previamente cortado a las dimensiones del marco del filtro prensa) en el siguiente orden:

- \* placa.
- \* medio filtrante.
- \* marco.
- \* medio filtrante.
- \* placa.

Los orificios que poseen las placas y los marcos deberán coincidir con los del medio filtrante, así como los orificios que las placas y los marcos poseen grabados en su costado deberán coincidir hacia el mismo lado.

8.- Cerrar el filtro prensa haciendo uso del tornillo sin fin.

### b) FUNCIONAMIENTO :

1.- Antes de llevar a cabo la filtración se deben de lavar el filtro prensa para lo cual se debe abrir la válvula de alimentación del agua, accionando simultáneamente la bomba. Recuperando el agua a través de la válvula del filtrado (para posteriores repeticiones), cerrar la válvula de alimentación y apagar la bomba.

2.- Abrir la válvula de alimentación de la suspensión (manteniendo en funcionamiento el agitador) y la válvula del filtrado, accionando simultáneamente la bomba.

3.- Controlar la presión que se desea controlar con la válvula de control (se encuentra montada en la tubería de recirculación).

4.- Cuantificar los tiempos de filtrado para cada volumen obtenido del mismo previo establecimiento.

5.- Una vez recuperado el volumen total del filtrado, cerrar la válvula de alimentación de la suspensión y dejar que la bomba funcione hasta que ya no salga volumen de filtrado.

#### c) DESMONTAJE :

1.- Apagar la bomba.

2.- Abrir el filtro prensa haciendo uso del tornillo.

3.- Retirar la torta formada sacando la (s) placa (s) y el (los) marco (s) en los que se encuentra el medio filtrante. Tener cuidado de no romper la torta formada.

4.- Cuantificar el espesor y la humedad de la torta.

5.- Lavar el medio filtrante y las placas y marcos si es necesario.

6.- Montar nuevamente de acuerdo al peso 7 del montaje.

7.- Cerrar el filtro prensa haciendo uso del tornillo sin fin.

8.- Cuantificar el tiempo muerto, el cual comprende el desmontaje y montaje del filtro prensa así como el lavado del medio filtrante.

La caracterización se llevo a cabo con una suspensión de tierra diatomeas y a la concentración establecida y comprobado que formó el espesor de la torta de 1/4" y se obtuvieron las siguientes condiciones de operación.

1.- El área de un marco es de  $0.0452\text{m}^2$  y conste de 10 marcos con sus respectivas placas y una placa terminal.

2.- Rango de presiones controlable por un usuario  $0.1 - 1.6 \text{ Kg/cm}^2$ .

3.- Acomodo de los marcos, estos tienen unas marcas en un lado y estos deben estar en la posición de la salida del filtrado.

4.- El medio filtrante debe acomodarse adecuadamente, ya que de no ser así habrá un mayor número de fugas y no obtendremos una buena filtración.

5.- El cerrado de placas y marcos, debe hacerse hasta el llegue del tornillo sin fin y no pretender cerrarlo más, es decir, no utilizar palancas para cierre.

6.- La capacidad de los tanques alimentarios es de 30 lts. c/u.

7.- Para el arranque de la bomba es necesario sebarla con agua antes de hacer pasar la suspensión a filtrar.

8.- La agitación se hace por medio de un agitador de aire para evitar posibles sedimentaciones.

Obj. 3.2:

Obtener las constantes de filtración ( $\alpha$ ,  $R_m$  y  $S$ ) en el filtro prensa, en base a condiciones de escalamiento establecidos en el sistema prueba.

### ESCALAMIENTO

La secuencia que se siguió es la siguiente:

- 1.- Elección del espesor a extrapolar.
- 2.- Establecimiento del  $(-\Delta P)$  a extrapolar.
- 3.- Determinación de la velocidad final =  $f(-\Delta P, E)$ , la cual se va a mantener constante durante la extrapolación.
- 4.- Extrapolación Kg. de sólidos.
  - \* Cálculo de  $X$  para un espesor =  $1/4"$  y un área de  $0.0182 \text{ m}^2$ .
  - \* Cálculo de  $X$  para un área de  $0.0452 \text{ m}^2$ .
- 5.- Leer de los gráficos los valores de  $K_p$  y  $B$  para las condiciones fijadas
- 6.- Identificar las áreas en cuestión.
- 7.- Sustituir en las ecuaciones para extrapolar.
  - a) Cálculo de la nueva  $K_p$  en función de  $(-\Delta P)$ :

$$K_p = (K_p / 2) \frac{(A \text{ celda})^2}{(A_{fp})^2} (-\Delta P / -\Delta P_{fp})$$

- b) Cálculo de la nueva  $B$  en función de  $(-\Delta P)$ :

$$B = B (A \text{ celda} / A_{fp}) \left( \frac{-\Delta P \text{ celda}}{-\Delta P_{fp}} \right)$$

- c) Sustitución de  $K_p'$  y  $B'$  en la ecuación de filtración.

$$\Delta \theta / \Delta V = K_p' V + B$$

Donde  $1/(\Delta \theta / \Delta V)$  = velocidad final propuesta.

$V$  = Volumen propuesto.

El escalamiento se divide básicamente en dos partes la primera consiste en un cálculo teórico de la presión a la cual se obtienen la velocidad promedio de filtración en la celda de la presión en la condiciones de presión 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>.

En esta primera parte una vez que se conoce la tendencia del proceso en las condiciones citadas y sus respectivos parámetros (Rm y  $\alpha$ ) con la variación de la presión se toma una área mayor de filtrado, la cual corresponde al filtro prensa y a partir de todos los datos anteriores se determina la presión a la que operará el filtro prensa, para las condiciones establecidas.

1. Determinar el volumen de filtrado y área de filtración (número de marcos).

2. Por criterio cinemático.:  
 $V_c \geq V_{fp}$

donde :  
 $V_c$  = velocidad de la celda.  
 $V_{fp}$  = velocidad en filtro prensa.

3. Y por criterio dinámico considerando que la presión para filtro prensa debe situarse entre las presiones de trabajo de la celda a presión con tanque mezclador.

$$\Delta\theta/\Delta V = k_p' V + B'$$

donde :  
 $k_p'$  = Cte. de filtración a Pcte para el filtro prensa.  
 $B'$  = Cte. de filtración a Pcte para el filtro prensa.

$$\Delta\theta/\Delta V = \frac{k_p A_1^2 \Delta P_1 V}{A_2^2 \Delta P_2} + \frac{B A_1 \Delta P_1}{A_2 \Delta P_2}$$

$k_p$  = Cte. de filtración a Pcte para el filtro prensa.  
 $B$  = Cte. de filtración a Pcte para el filtro prensa.  
 $A_1$  = Area de filtración en C.P.  
 $\Delta P_1$  = Caída de presión en C.P.  
 $A_2$  = Area de filtración en F.P.  
 $\Delta P_2$  = Caída de presión en F.P.

4. Se sustituyen los valores de la ecuación en la resolución numérica.

5. Después de la resolución numérica se requiere experimentar en filtro prensa con la presión obtenida teóricamente , y calcular la velocidad promedio de este proceso de filtración en el filtro prensa. Posteriormente se comparan dichas velocidades y si no son iguales, se obtiene el factor o índice de proporcionalidad que guarda una con respecto a la otra y de esta manera se conforma el escalamiento.

La finalidad de conocer el factor , es de alguna manera la corrección por forma, así como poder utilizar esta relación independientemente del número de marcos que se tenga.

## RESOLUCION NUMERICA DEL ESCALAMIENTO

(En base a los resultados obtenidos).

### A. EXTRAPOLACION PARA UN MARCO.

\* (Condiciones para mínima  $-\Delta P$  en la celda.) :

- 1.- Espesor de 1/4".
- 2.-  $(-\Delta P)$  de 0.7 Kg/cm<sup>2</sup>.
- 3.- Volumen = 100 =  $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Extrapolación de X

Para 1/4" =  $6.3451 \times 10^{-3} \text{ m}$ ; X = 0.0993 Kg.

la concentración debe mantener al 99% por lo cual el volumen es de  
10 litros =  $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

- 4.-  $K_p = 1392712.55 \text{ S/m}^6$ .  
B =  $3773.27 \text{ S/m}^3$ .
- 5.- A celda =  $0.0182 \text{ m}^2$ .  
A prensa =  $0.0452 \text{ m}^2$ .
- 6.-  $K_p' = 700010.20 \text{ S/m}^6$ .  
B' =  $3780.00 \text{ S/m}^3$ .
- 7.- Entonces:  
 $\theta/V = K_p' V + B'$   
 $= 0.199899 \text{ Kg/cm}^2 = 2 \text{ Kg/cm}^2$ .

\* (Condiciones para la máxima presión en la celda) :

- 1.- Espesor de 1/4".
- 2.-  $(-\Delta P) = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$
- 3.- Volumen = 100 =  $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ .
- 4.-  $K_p = 1139080.29 \text{ S/m}^6$ .  
B =  $2286.73 \text{ S/m}^3$ .
- 5.- A celda =  $0.0182 \text{ m}^2$ .  
A prensa =  $0.0452 \text{ m}^2$ .
- 6.-  $K_p' = 570110.11 \text{ S/m}^6$ .  
B' =  $2293.60 \text{ S/m}^3$ .
- 7.- Entonces:  
 $\theta/V = K_p' V + B'$   
 $= 0.49998 \text{ Kg/cm}^2 = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$ .

**DE ACUERDO A LO DESARROLLADO SE ESTABLECEN LAS SIGUIENTES  
CONDICIONES PARA TRABAJAR EN FILTRO PRENSA**

- 1.- No. de marcos : 1
- 2.- Area =  $0.0452 \text{ m}^2$ .
- 3.- X = 99.3 g de sólidos.
- 4.- E = 1/4"
- 5.- Volumen de agua : 10 litros.
- 6.- Concentración : 1%
- 7.- (- $\Delta P$ ) : 0.2, 0.5 Kg/cm<sup>2</sup>.

Con estos - $\Delta P$ , se obtuvieron las constantes de filtración del filtro prensa Kp, B,  $\alpha$ , Rm para poder comprobar el escalamiento.



## DESARROLLO EXPERIMENTAL EN FILTRO PRENSA

Se hicieron cálculos en el experimento tomando los tiempos cada litro, se obtuvo  $\Delta V$  y  $\Delta t$  y se gráfico  $\Delta V/\Delta t$  con  $\bar{V}$ , para obtener B y  $k_p$  con una nueva área.

**TABLA No. 7**

$-\Delta P = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  en Filtro Prensa

$\bar{V}$	$\frac{\Delta t}{\Delta v}$ $\times 10^2$
--	--
0.5	3.53
1.5	10.53
2.5	17.53
3.5	24.53
4.5	31.53
5.5	38.53
6.5	45.53
7.5	52.53
8.5	59.53
9.5	66.53

**TABLA No. 8**

$-\Delta P = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  en Filtro Prensa

$\bar{V}$	$\frac{\Delta t}{\Delta v}$ $\times 10^2$
--	--
0.5	2.87
1.5	8.57
2.5	14.27
3.5	19.97
4.5	25.67
5.5	31.37
6.5	37.08
7.5	42.78
8.5	48.48
9.5	54.18

Grafico  $\Delta t/\Delta V$  vs  $\bar{V}$  para  $-\Delta P = 0.5$

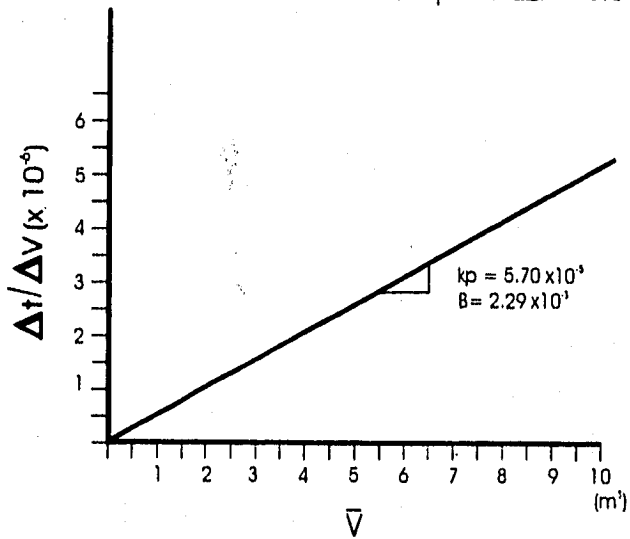
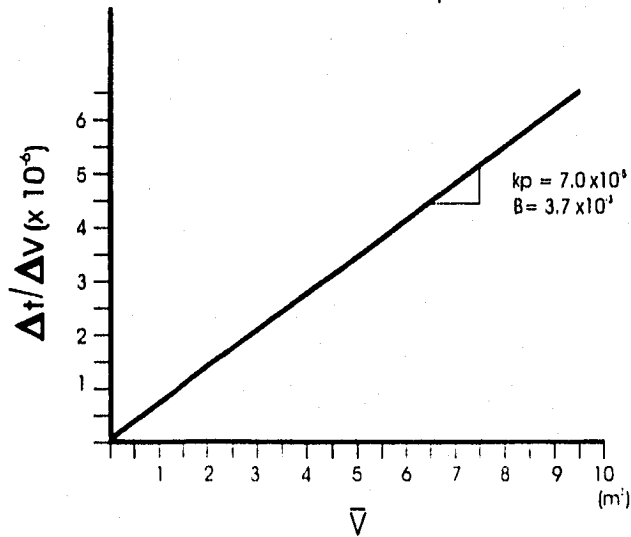


Grafico  $\Delta t/\Delta V$  vs  $\bar{V}$  para  $-\Delta P = 0.2$



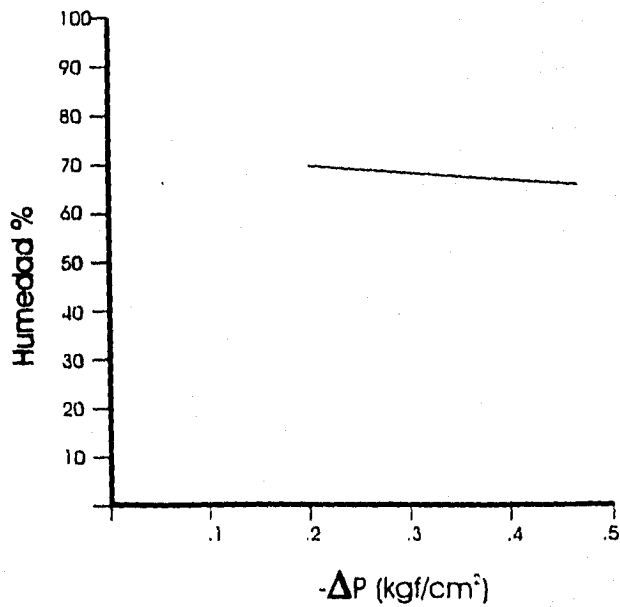
Obj. 3.3.

**TABLA No. 9**

**FILTRO PRENSA**  
A=0.0452 m<sup>2</sup>  
(1 marco)

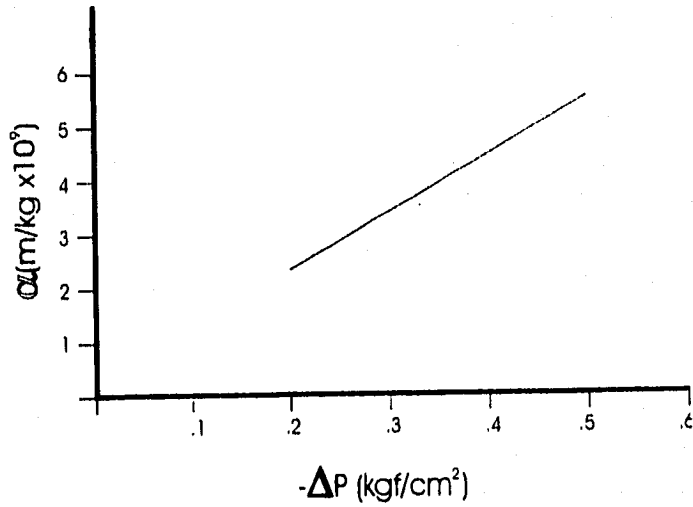
$-\Delta P$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$K_p$ (g/m <sup>3</sup> )	$B$ (g/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ m <sup>3</sup> /kg $\times 10^3$	$R_m$ (m <sup>3</sup> ) $\times 10^3$	Humedad (%)	$C_{esp}$ (kgol/m <sup>3</sup> )
0.2	700010.20	3780.00	2.59	3.10	70	10.03
0.5	570110.11	2293.60	5.2	4.71	66	10.50

Grafica de humedad vs  $-\Delta P$

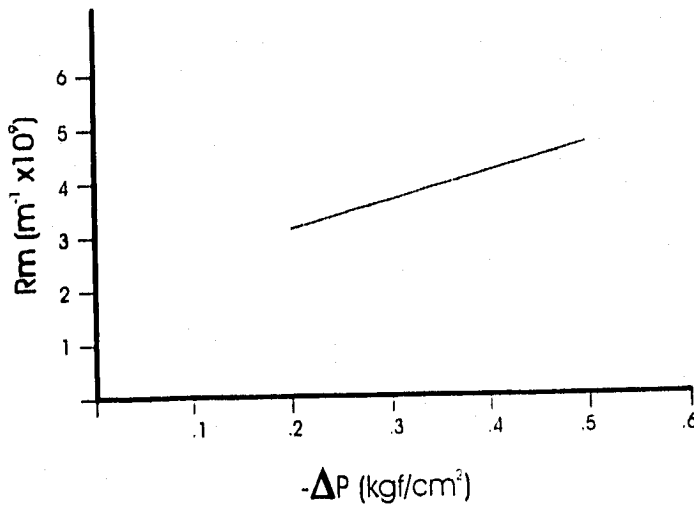


ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Grafica de resistencia especifica ( $\alpha$ ) vs  $-\Delta P$



Grafica de resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ) vs  $-\Delta P$



Obj. 4

Se llevó a cabo la comprobación del escalamiento en el sistema Filtro Celda a Presión y Filtro Prensa ; los datos comparativos se reportan en la siguiente tabla.

**TABLA No. 10**

**SISTEMA PRUEBA Y FILTRO PRENSA**

E= 1/4 in

$$C = \frac{10 \text{ kg Sólido}}{\text{m}^3 \text{ filtrado}}$$

$$M_{n,o} = 1.005 \times 10^{-3}$$

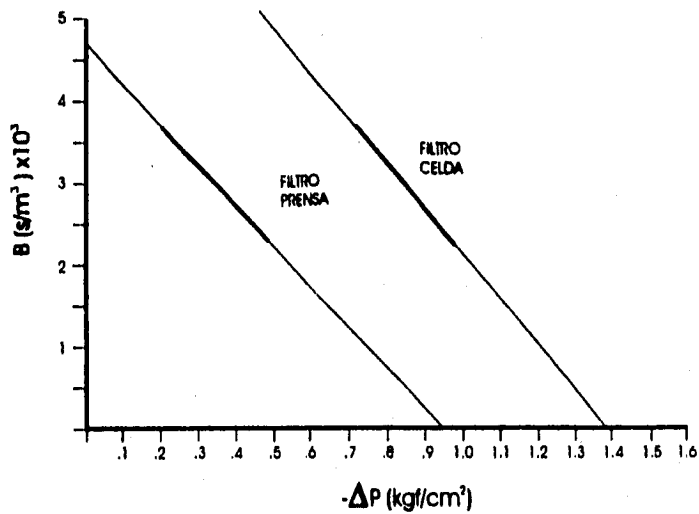
x= 0.04 kg sol.

$$gc = 1 \text{ kg/mNs}^2$$

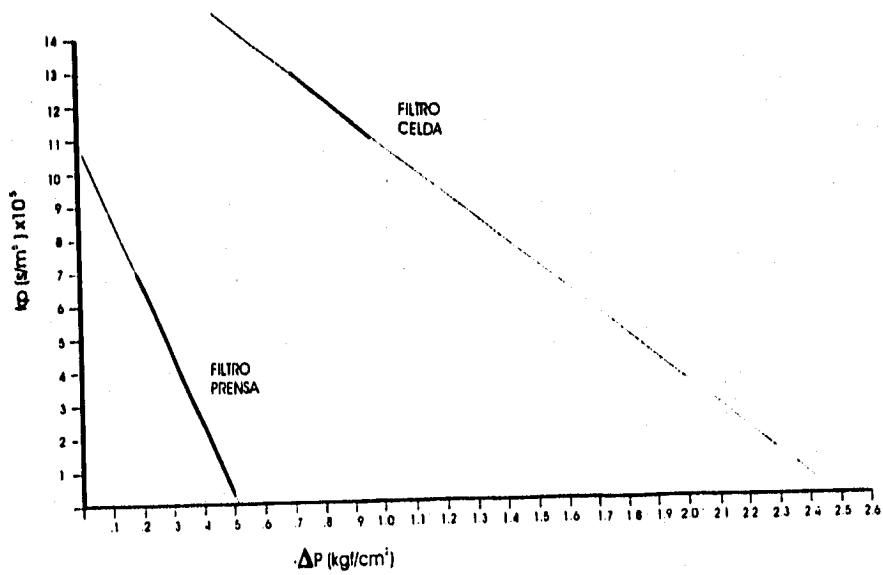
Equipo	Area (m <sup>2</sup> )	(ΔP) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Kp (s/m <sup>2</sup> )	B (s/m <sup>2</sup> )	α m(Kg) x10 <sup>9</sup>	Rm (m-1) x10 <sup>9</sup>
Filtro Celda	0.0182	0.7	1392712.55	3773.27	3.15	4.69
		1.0	113908.29	2286.73	3.68	4.06
Filtro Prensa	0.0452	0.2	700010.20	3780.00	2.59	3.10
		0.5	576110.11	2293.60	5.2	4.71

A continuación aparecen los gráficos comparativos entre los dos equipos

Grafica de B vs  $\Delta P$



Grafica de  $k_p$  vs  $\Delta P$



## CONCLUSIONES FINALES

El objetivo general que se planteó en este proyecto era diseñar, construir y validar un sistema de filtración intermitente a presión constante para poder realizar pruebas que me permitieran escalar a equipos de mayor dimensión por fortuna contamos también con un equipo piloto que nos permitió comparar dicho escalamiento y con lo cual podemos decir :

- Se planteó una secuencia de cálculo para llevar a cabo el escalamiento que se fundamentó básicamente en el cambio de área y se comprobó que este no afecta la velocidad de filtración cuando se corrige la caída de presión, en este caso particular el factor de corrección es de 0.5 Kg/cm<sup>2</sup> como diferencia entre los dos sistemas.

- Los valores de Kp, en el equipo diseñado fueron el doble del equipo piloto, esto resulta ser muy satisfactorio al analizar la ecuación.

$$k_p = \frac{\mu \alpha C_s}{A_f^2 (-\Delta P)}$$

y vemos que el área del equipo piloto es casi dos veces mayor y se encuentra elevada al cuadrado con respecto al equipo diseñado.

- Los valores de Rm en los dos equipos si varían significativamente, lo que quiere decir que el cambio de área y de -ΔP afectan a la resistencia del medio filtrante.

- Los valores de la resistencia específica de la torta (α) se ven ligeramente afectados por el -ΔP, esto es por que la semejanza geométrica es muy similar y esta sólo se ve afectada por el área y como consecuencia puede corregirse k<sub>p</sub> y β manteniendo constantes todas las demás condiciones.

- La ordenada al origen (β) es muy similar en los dos equipos.

- Como la validación es una técnica que permite establecer la confianza o validez de un método o instrumento a emplear esta nos permitió establecer la confiabilidad de las lecturas del equipo construido para lo cual se fundamentó en la precisión, repetibilidad, reproducibilidad y su linealidad, todos los datos se evaluaron cuantitativamente y los análisis estadísticos que se emplearon nos arrojaron datos con un coeficiente de variación menor al 5% en el 75% de los datos con esto podemos afirmar que el equipo es valido para realizar cualquier tipo de pruebas de filtración intermitente.

- Se pudo comprobar entonces que el equipo diseñado ha resultado arrojar datos validos que sirven para poder realizar diseños a nivel industrial, aunque el equipo es muy simple; también es muy versátil y puede ser utilizado para una amplia gama de

### RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un sistema de medición para el volumen de filtrado más exacto (un tanque de recepción de filtrado con una columna de nivel).
- El  $\Delta P$  diferencial entre el tanque mezclador y la celda de filtración a presión será diferente para cada suspensión dependiendo de la concentración y de la naturaleza de los sólidos y por eso es recomendable que al caracterizar el equipo encontrar dicho  $\Delta P$  de diferencia (revisar el manual de operación del equipo).
- El sistema diseñado cuenta con dos formas de agitación para la suspensión ; una con aire y otra con una probeta con el mismo fin, sin embargo es necesario implementar un sistema de agitación más adecuado para mejorar la homogeneidad de la suspensión.
- Este equipo fue diseñado para hacer pruebas tanto para materiales Incompresibles como para materiales compresibles; en el trabajo sólo se realizaron pruebas con incompresibles, así que queda abierto para que se realicen pruebas con cualquier tipo de materiales compresibles como lo son propiamente los fluidos alimenticios.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Apellaniz de la Puente. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA CLARIFICADOR DE JUGO DE MANZANA POR FILTRACIÓN. TESIS UNAM 1985.
- 2.- Baquero Franco, V. Llórente Martínez. EQUIPO PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA ALIMENTARIA. Ed. Allahambra 1985.
- 3.- Barril Michel. VALIDACIÓN DE UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE. TESIS UNAM FES-C.
- 4.- Benett C.O., Myers J.E. MOMENTUM HEAT AND MASS TRANSFER. Ed. Mc Graw hill, 1983.
- 5.- Bernal Ortega J.A. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CONSTANTES DE FILTRACIÓN, TESIS UNAM 1976.
- 6.- Brennan. LAS OPERACIONES UNITARIAS DE LA INGENIERIA DE LOS ALIMENTOS. España 1981.
- 7.- Coulson M. INGENIERIA QUÍMICA. España 1991.
- 8.- Champman K.G. A SUGGESTED VALIDATION LEXICON PHARMACEUTICAL TECHNOLOGY. Agosto 1990.
- 9.- Christie J. geankoplis. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. Continental México 1989.
- 10.- Díaz Juan Manuel. PRUEBAN Y VALIDACIÓN DE UN IMPULSOR ADAPTABLE AL VISCOCIMETRO BROOKFIELD PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES REOLOGICAS EN SISTEMAS ALIMENTICIOS DEL TIPO SUSPENSIÓN. TESIS UNAM FES-C 1994.
- 11.- Dormand and Ward. FILTER EVALUATION AND TESTING, FILTRATION PRINCIPLES AND PRACTICES. Chemical industries No 27 New York 1987.
- 12.-Edgewort, Woldrige. PILOT PLANTS MODELS AND SCALE-UP, METHODS IN CHEMICAL ENGINEERING (criterios), CHEMICAL ENGINEERING SERIES (escalamiento). Mc Graw hill, Book company 1957.
- 13.- Finkelson, M.J. 1986. VALIDATION OF ANALYTICAL METHODS BY FDA LABORATORIES. Parte 2. Pharmaceutical tech Marzo 75 y 78.
- 14.- Foust A.S. PRINCIPIOS DE LA OPERACIONES UNITARIAS . Jonh Willey Sons 1980.
- 15.- Grace. H.P. RESISTANCEAND COMPRESSIBILITY OF FILTER CAKES. Chemical Enginnering Process. Vol. 49 No 8 1953.

- 16.- García F.J.R., Rebolla M.R. DISEÑO ENSAMBLE Y VALIDACIÓN DE UN APARATO DE DISOLUCIÓN FARMACEUTICO. TESIS Q.F.B. UNAM FES-C. 1981.
- 17.- Hsing. LIQUID-SOLID FILTRATION GENERALIZED DESIGN AND OPTIMIZATION EQUATIONS. Chemical engineering Julio 1978.
- 18.- Jifi Marecek. FILTER CLOTH PLUGGING AND ITS EFFECT ON THE FILTER PERFORMANCE. Ind. and Eng. Chem. Vol 20 No 4. 1986.
- 19.- Johns Manville. DOCUMENTO TECNICO COMO EL CELITE AYUDA A LA FILTRACIÓN. 1980.
- 20.- Johnson. PILOT PLANTS-METHOD AND SCALE UP METHODS, Mc Graw Hill. New York 1957.
- 21.- Ladislav Svarousky. RECENT ALTERNATIVES THAT BOOST RECOVERIES OR CUT COST. Chemical Engineering Julio 1978.
- 22.- Larry Paul USP. PERSPECTIVES ON ANALYTICAL METHODS VALIDATION. Pharmaceutical technology Marzo 1988.
- 23.- Loftus R., Nash W. PHARMACEUTICAL PROCESS VALIDATION, Marcel USA DEKKER 1984.
- 24.- Matteson I.M. FILTRATION PRINCIPLES AND PRACTICES. Chemical industries Vol 7 1986.
- 25.- Mc Cabe. OPERACIONES BASICAS DE LA INGENIERIA QUÍMICA. Vol 2 España 1959.
- 26.- Miller. S.A. FILTRATION. Ind. and Eng. Chem. Vol 47 No 3 1978.
- 27.- Accon-Tojo. PROBLEMAS DE INGENIERIA QUÍMICA OPERACIONES BASICAS. Tomo II Madrid 1970.
- 28.- Perry J.A. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO. Mc Graw Hill 1963.
- 29.- PMA'S Computer. SYSTEM VALIDATION COMMITTEE VALIDATION CONCEPT FOR COMPUTER SYSTEMS USED IN THE MANUFACTURE OF DRUG PRODUCTS. Pharmaceutical Tech Mayo 1992.
- 30.- Rase. H.F. y M.H. Barrow. INGENIERIA DE PROYECTO PARA PLANTAS DE PROCESO. Ed CECSA. México 1989.
- 31.- Ruth B.F. STUDIES IN FILTRATION. Industrial and Engineering Chemistry Vol 27 No 6 June 1935.
- 32.- Ruth B.F. STUDIES IN FILTRATION. Industrial and Engineering Chemistry Vol 27 No 6 July 1935.
- 33.- Ruth B.F. STUDIES IN FILTRATION. Industrial and Engineering Chemistry Vol 25 No 1 Enero 1993.

- 34.- Ruth B.F. CORRELATING FILTRATION THEORY WITH INDUSTRIAL PRACTICE. Industrial and Engineering Chemistry Febrero 1953 Vol 45 No 6.
- 35.- Ruth B.F. STUDIES IN FILTRATION. Industrial and Engineering Chemistry Vol 25 Febrero 1993.
- 36.- Sperry D.R. ANALYSIS OF FILTRATION DATA. Industrial and Engineering Chemistry Vol 36 No 2 April 1944.
- 37.- Toledo. FUNDAMENTALS OF FOOD PROCESS ENGINEERING. New York 1991.
- 38.- Walpolle R.E., Myers R.H. PROBABILIDAD Y ESTADISTICA. Mc Graw Hill México 1992.
- 39.- Wayne W. Daniel. Bioestadística. Limusa México 1985.
- 40.- William Q. Hull. DIATOMACEOUS EARTH. Industrial and Engineering Vol 45 No 2 Febrero 1953.
- 41.- Woldirge E. PILOT PLANTS MODELS AND SCALE-UP METHODS IN CHEMICAL ENGINEERING (criterios) CHEMICAL ENGINEERING SERIES (escalamiento). USA 1957.