

i

**BIBLIOTECA FAC. DE QUIMICA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

SISTEMAS DE ALTA EFICIENCIA PARA FILTRACION DE AIRE.

INGENIERO QUIMICO

RODRIGO DE BENGOCHEA OLGUIN.

1967



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.

1967

---

LODRIGO DE BENGOCHEA OLGIN.

JURADO ASIGNADO.

CONSTANTINO ALVAREZ M.  
Presidente

HECTOR LOPEZ HERRERA.  
Vocal

JULIO TERAN ZA VALETA  
Secretario

ENRIQUE ALARCON R.  
1er. Suplente

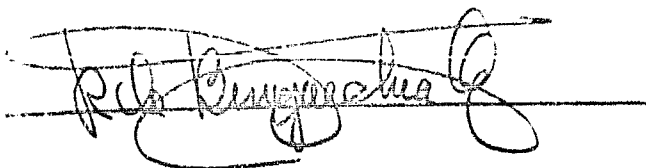
FERNANDO ITURBE HERMAN  
2o. Suplente.

Lugar en que se desarrolló el tema:

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

RODRIGO DE BENGOCHEA OLGUIN  
Sustentante

CONSTANTINO ALVAREZ M.  
Asesor del Tema.



\_\_\_\_\_

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A TODO AQUELLO QUE ES GRANDE Y BUENO

I N D I C E

Definitoria .....	3
Capítulo I.- Generalidades .....	5
Capítulo II.- Equipo industrial para separación de polvo .....	13
Capítulo III.- Filtros de Alta Eficiencia .....	31
Capítulo IV.- Experimentación .....	58
Sistema de cálculo para determinar la eficiencia de Filtración.	68
Capítulo V.- Conclusiones .....	72
Epilogo.- .....	75

## CAPITULO I

## GENERALIDADES

En la actualidad, la contaminación del aire es un serio problema que afecta a todos los sectores de nuestra sociedad.

Cuando gran parte de la plantas químicas y de proceso fueron instaladas, quedaban muy alejadas de los centros de población, pero el gran crecimiento demográfico e industrial de nuestro país, ha hecho que las industrias hayan quedado totalmente rodeadas por zonas residenciales. Este fenómeno se repite año con año con el crecimiento de las ciudades. (1)

Durante las últimas décadas, se ha hecho una contaminación irracional de la atmósfera, ya que durante mucho tiempo se consideró que el aire y el agua eran "diluyentes infinitos". Se ha visto con pánico que la capacidad de éstos para aceptar desechos ha decrecido notablemente.

Definiremos como aire contaminado a aquel que contiene sustancias que son productos de la actividad del hombre. El aire en la naturaleza contiene sustancias como son la Sal marina, humo producido por los incendios forestales, polvos minerales, producto de la erosión, fragmentos orgánicos de plantas y organismos vivos como bacterias y hongos, polen y por supuesto partículas de agua.

El cloruro de sodio, por ejemplo, varía su concentración en la atmósfera de  $4\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los lugares más secos, a  $22\text{mg}/\text{m}^3$  en las tierras cercanas al mar.

Tabor y Warren (2) dan una tabla de los contaminantes metálicos más generales en la Estados Unidos:

METAL	NIVEL_BAJO ug/m <sup>3</sup>	NIVEL_ALTO ug/m <sup>3</sup>
ZINC	0.4	49
HIERRO	0.23	30
COBRE	0.05	30
PLOMO	0.33	17
MANGANESO	0.01	3
BARIO	0.005	1.5
ESTAÑO	0.004	0.8
ANADIO	0.002	0.6
TITANIO	0.01	0.24
NIQUEL	0.005	0.20
CROMO	0.002	0.12
CADMIO	0.002	0.10
BISMUTO	0.002	0.03

TABLA 1

Weldon B. Gibson (3) dice:



" Es necesario hacer ver al industrial, que el costo del control de polvos y contaminantes atmosféricos, no excede más de 10 a 15% del costo total, de la instrumentación de una planta y la ganancia, social y económica es cuantiosa en relación a ésta!"

La contaminación atmosférica no solamente produce problemas técnicos y económicos, es necesario incluir los problemas humanos que son muy importantes; hay que prever las reacciones fisiológicas y psíquicas de los trabajadores y el público.

El control de la contaminación del aire no únicamente provee una atmósfera agradable para el trabajo, sino que, también evita grandes pérdidas de materiales.

Las relaciones de la industria con el público son afectadas grandemente por la contaminación que produce la primera y es de capital importancia el control para asegurar la supervivencia de ésta en los centros de población.

En nuestra ciudad los ejemplos son sumamente numerosos: las nueve plantas de concreto asfáltico que había en el Distrito Federal en 1963 tenían una producción de 80,000 ton/mes. En estas se ha visto (4) que el polvo que emiten los secadores rotativos (suponiendo una recuperación del 50%) tiene los siguientes valores:

Mínimo 1456 Ton/mes

Máximo 1860 Ton/mes

Si se considera un valor a este polvo de concreto asfáltico de \$ 30.00/ton. se ve una pérdida de \$43,600.00 en el mejor de los casos y de \$ 55,900.00 en el máximo de pérdidas.

El costo de un equipo de recuperación, se paga totalmente en unos pocos meses. Ya que el dinero es el factor principal que mueve a una industria, es necesario hacer ver estas cifras reveladoras.

En las legislaciones industriales, se ha calculado un nivel máximo de contaminación para un obrero que labora 8hrs. al día durante 6 días de la semana.

Pero no se ha considerado que la población está expuesta a la toxicidad del aire 24hrs. al día durante toda su vida y que los niños tienen una menor capacidad para resistir una atmósfera insana. El nivel máximo tolerable debe verse aquí, donde los seres vivos están expuestos siempre. Además, la exposición simultánea a varios contaminantes puede ser más dañina que la suma de éstos aisladamente.

Actualmente, la industria nuclear ha creado un problema de contaminación de magnitudes gigantescas; pequeñísimas concentraciones de plutonio, uranio, cobalto, etc. en la atmósfera pueden ser fatales para un gran número de seres vivos; las técnicas de descontaminación han tenido que ser altamente depuradas para dejar niveles de contaminación del orden de  $10^{-8}$  mg/m<sup>3</sup>

Se debe considerar que los desechos, "venenos industriales" como

los llama la U.S. Technical Commission of Air Pollution, tienen 3 vías principales para afectar el cuerpo humano:

- 1.- Respiración: polvos, humos, nieblas y gases;
- 2.- Ingestión: las aguas y productos alimenticios contaminados causan serios trastornos fisiológicos;
- 3.- Absorción: se realiza a través de la superficie de la piel.

El envenenamiento de la flora y la fauna por venenos metálicos, Alkalís y una gran variedad de desechos, ocasionan pérdidas irreparables para un país. Un caso típico en Europa es el detergente no biodegradable, contra el cual se han hecho incluso legislaciones.

Los efectos fisiológicos principales que pueden causar los contaminantes atmosféricos son:

- 1.- La irritación de las mucosas nasales y posteriormente todo el sistema respiratorio y los ojos.
- 2.- Al penetrar en los pulmones y ser absorbidos por la sangre - causan un envenenamiento sistemático del organismo; ejemplos de este fenómeno son: el vapor de benceno, el CO, los vapores de mercurio, polvos de plomo, etc.
- 3.- Pueden provocar asfixia afectados los centros respiratorios-

y causando serios daños al sistema nervioso. Acido cian -  
hídrico, sulfhídrico, bióxido de arsénico, etc.

- 4.- Polvos del tipo del óxido de silicio, el asbesto, la hulla etc., producen neumoconiosis y predisponen al individuo a la tuberculosis.

Las partículas mayores de 20 $\mu$  son detenidas en la mucosa nasal - pero más pequeñas llegan a los pulmones facilmente, es importante la solubilidad que puedan tener al penetrar en el cuerpo humano. Cuando una partícula llega al orden de 0.1 $\mu$  se considera soluble, debido a que es capaz de penetrar membranas biológicas.

#### CLASES DE CONTAMINANTES

Los contaminantes atmosféricos (5) se han clasificado como:

A.- Gases y vapores;

B.- Partículas en suspensión;

1.- Polvo: partículas sólidas de tamaño superior al coloidal y capaces de permanecer suspendidas temporalmente en un gas.

2.- Humo: pequeñas partículas resultantes de la combustión incompleta de una substancia.

3.- Fumo: partículas muy pequeñas resultantes de reacciones químicas o de condensación de vapores; generalmente son metales u óxidos metálicos y pueden ser de composición diferente a la fuente de la cual provienen.

- 4.- Niebla: condensación de vapores sobre pequeños núcleos en el seno de un gas.
- C.- Seres vivos: bacterias, virus, esporas: su concentración y su tamaño son generalmente muy pequeños.

Gibbs (6) dió el término aerosol para definir los sistemas de dispersión coloidal en el aire. Los aerosoles de  $\pm 50\mu$  son estables únicamente bajo condiciones muy severas de turbulencia. Se han encontrado partículas menores de  $0.01\mu$  pero su tiempo de vida es muy corto.

Se ha visto que la variación de la concentración de los contaminantes atmosféricos es del orden de  $10^3$  y varían en  $10^3$  en tamaño de partícula. Es evidente que las técnicas de purificación de aire deben tener una amplia variedad de equipos para la solución de los problemas industriales.

## CAPITULO I

## B I B L I O G R A F I A

- (1) Melvin Nord, Wayne University, Detroit Mich. "Pollution Control"; Chem. Eng. Report, May 1951.
- (2) Tabor E.C., Warren W.V. Archs. Ind. Hlth 17 (1958) 145.  
tomado de High Efficiency Filtration P.A.F. White, S.E. Smith Butterworths 1964.
- (3) Gibson W.B. " Air Pollution; Economics"  
Chem. Eng. march (1950).
- (4) Escobar Márquez Raul, " Diseño del equipo de control de polución atmosférica para una planta de concreto asfáltico ESIOIE 1963.
- (5) Leslie Silverman; Dep. of industrial hygiene, Harvard  
" What process cause air pollution?"  
Chem. Eng. may (1951)
- (6) Gibbs; "Clouds and smoke" (1924) New York, Blakiston.

## CAPITULO II

### EQUIPO INDUSTRIAL PARA SEPARACION DE POLVO

El equipo que se emplea en la industria para la separación del polvo en una corriente gaseosa por la cual es acarreada, se divide en la siguiente forma:

- 1.- Cámaras de asentamiento;
- 2.- Separadores por inercia;
- 3.- Depuradores y lavadores;
- 4.- Filtros;
- 5.- Precipitadores eléctricos;
- 6.- Precipitadores sónicos.

Antes de iniciar el estudio de los equipos industriales para la separación de polvo, es conveniente hacer algunas consideraciones sobre la dinámica de las partículas.

Al caer una partícula libremente en el seno de un gas en reposo su velocidad se incrementa gradualmente debido a la aceleración de la gravedad sobre la partícula. Este incremento de velocidad se realiza hasta que la fricción de la partícula con el gas, al caer, equilibra a la aceleración de la gravedad; a la velocidad constante que toma la partícula - en estas condiciones se le llama velocidad terminal, o velocidad de sedimentación libre; y esta representada por la siguiente ecuación:

$$u_t = \left( \frac{(2 g m_p) (\rho_s - \rho)}{\rho \rho_s A_p C} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

en esta ecuación las variables son:

$g$  : aceleración debida a la acción de la gravedad;

$m_p$  : masa de la partícula (medida estadística);

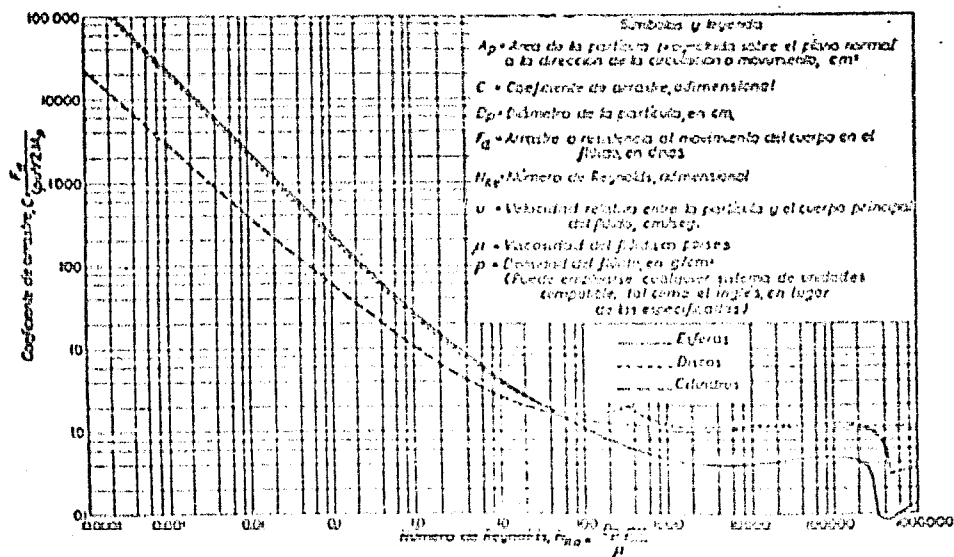
$\rho_s$  : densidad del sólido;

$\rho$  : densidad del gas;

$A_p$  : área proyectada por la partícula;

$C$  : coeficiente de arrastre.

El coeficiente de arrastre  $C$ , ha sido estudiado ampliamente por Lapple y Shepherd (1), y por Prandtl y Tietjens (2); se han graficado los valores del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds para esferas, discos y cilindros. (fig. 1)





Cuando el número de Reynolds es menor de 2, el coeficiente de arrastre queda comprendido en una parte de la curva que es lineal y de pendiente determinada; por esta razón se puede escribir la siguiente ecuación:

$$C_{Re} = 24 \quad ( 2.2 )$$

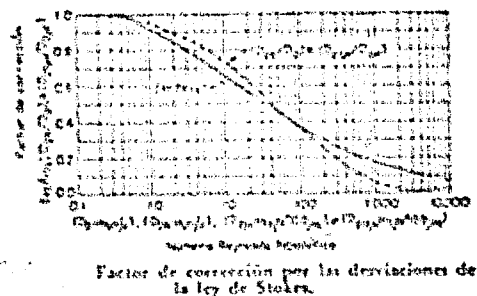
Esta ecuación es aplicable únicamente en el rango de operación de la ley de Stokes, para partículas con un diámetro medio de 5 a 100 $\mu$ , y un número de Reynolds menor a 2.

Existe una seria restricción para la ley de Stokes cuando el diámetro de las partículas se aproxima a la trayectoria libre media de las moléculas del fluido; la resistencia será menor a la calculada, y por lo tanto la velocidad de sedimentación mayor (3). En estas magnitudes, el movimiento Browniano influye determinadamente en el comportamiento de las partículas (4); para partículas menores de 0.1 $\mu$ , el movimiento Browniano es más considerable que la velocidad de sedimentación. En este caso se multiplica el coeficiente de arrastre por un factor que está dado por la siguiente ecuación en función del camino libre medio.

$$C' = 1 + \frac{1.72 \lambda}{D_p} \quad ( 2.3 )$$

El empleo de la figura 1, implica una serie de aproximaciones sucesivas para la determinación del coeficiente de arrastre. Bosanquet, Carey y Stairmand (5), han desarrollado un método que implica el cálculo de la velocidad de sedimentación de acuerdo a la ley de Stokes, y después se aplica un coeficiente de corrección para considerar las desviaciones a la ley; este coeficien

te  $u_t / u_{ts}$  (fig. 2) es una función del número de Reynolds basado en la velocidad de sedimentación, calculada de acuerdo con la ley de Stokes. Estas consideraciones, pueden hacerse únicamente cuando la concentración del agente disperso es inferior a  $46g/m^3$ ; ya que a concentraciones mayores existe una interacción entre las partículas. (6)



( figura 2 )

### CAMARAS DE ASENTAMIENTO

Una cámara de asentamiento, es un recipiente grande, en relación al ducto que conduce el gas, cuya función consiste en reducir la velocidad de la corriente para permitir que el polvo se asiente por la acción de la gravedad.

La eficiencia de colección de una cámara de asentamiento se da por la siguiente ecuación:

$$n_m = \frac{u_t L_c}{H V} = \frac{u_t H L_c}{Q} \quad ( 2.4 )$$

En donde:

H : altura de la cámara;

$L_c$  : longitud de la cámara;

$u_c$  : velocidad terminal de sedimentación libre de las partículas;

V : velocidad del gas;

Q : flujo volumétrico de gas;

El diámetro mínimo de las partículas que pueden ser separadas por una cámara de asentamiento, está dado por la siguiente relación:

$$D_p = \left[ \frac{18 \mu H V}{g L_c (\rho_p - \rho)} \right]^{1/2} \quad ( 2.5 )$$

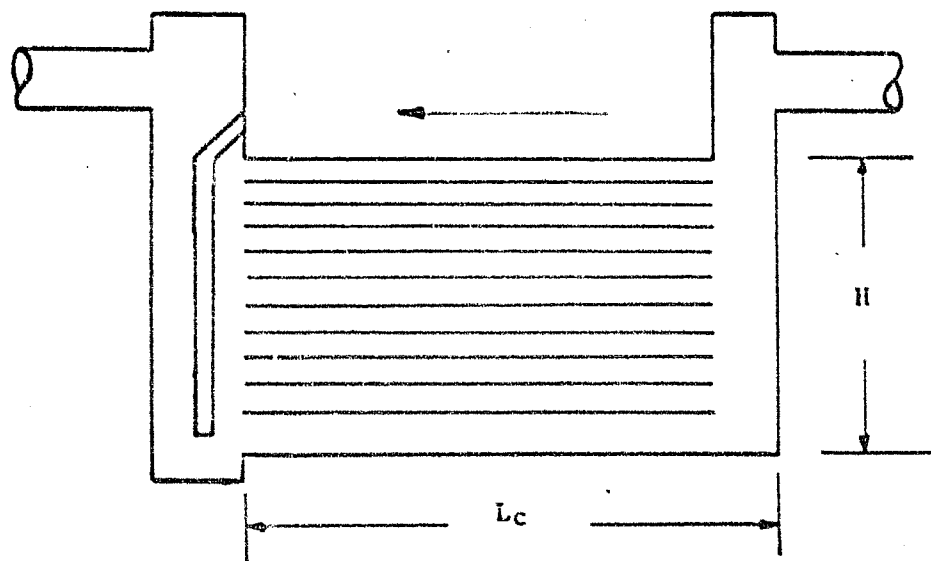
En donde:

$\mu$  : viscosidad del gas;

$\rho_p$  : densidad de partícula;

$\rho$  : densidad del gas.

En la práctica:  $D_p$  debe ser mayor de 40 a 50  $\mu$  para que la separación sea efectiva. Howard a introducido a las cámaras de asentamiento unos anaqueles horizontales para reducir la turbulencia y aumentar la eficiencia de depósito. (fig 3); para las cámaras con anaqueles horizontales, la ecuación ( 2.4 ) se multiplica por el número de anaqueles, y la ( 2.5 ) por la raíz cuadrada del número de anaqueles.



Cámara Howard de asentamiento fig. 3

### SEPARADORES POR INERCIA

En este tipo de equipo para la separación de una corriente gaseosa, se aprovecha la diferencia de densidades existentes entre el fluido y las partículas que lleva en suspensión; al hacer un cambio brusco en la dirección de la corriente, las partículas, por su inercia mayor tienden a continuar con la trayectoria que tenían originalmente, de esta manera son detenidas por choque sobre paredes rígidas y son recogidas posteriormente. De este tipo de aparatos, el más importante es el separador ciclónico, más comúnmente llamado ciclón.

Un ciclón es un aparato al cual penetra el fluido, cargado de partículas en suspensión, tangencialmente al cuerpo del aparato que es de forma cilíndrica, el gas al modificar su trayectoria para seguir la forma interna del ciclón forma una turbulencia en espiral dentro del equipo, las partículas en suspensión son forzadas hacia las paredes y posteriormente se depositan en el

fondo de el ciclón: en la parte superior del ciclón se haya el ducto de salida del gas, y en la parte inferior tiene una tolva para la separación de las partículas que se adhirieron a las paredes internas del aparato. (fig 4)

Un ciclón es un equipo de separación cuyo funcionamiento se debe realizar a alta velocidad; Rosin, Ramler e Intelman (7) asumiendo una fuerza centrífuga constante en el interior de un ciclón han dado la siguiente ecuación para el diámetro de partícula mínimo que puede ser separado por un ciclón.

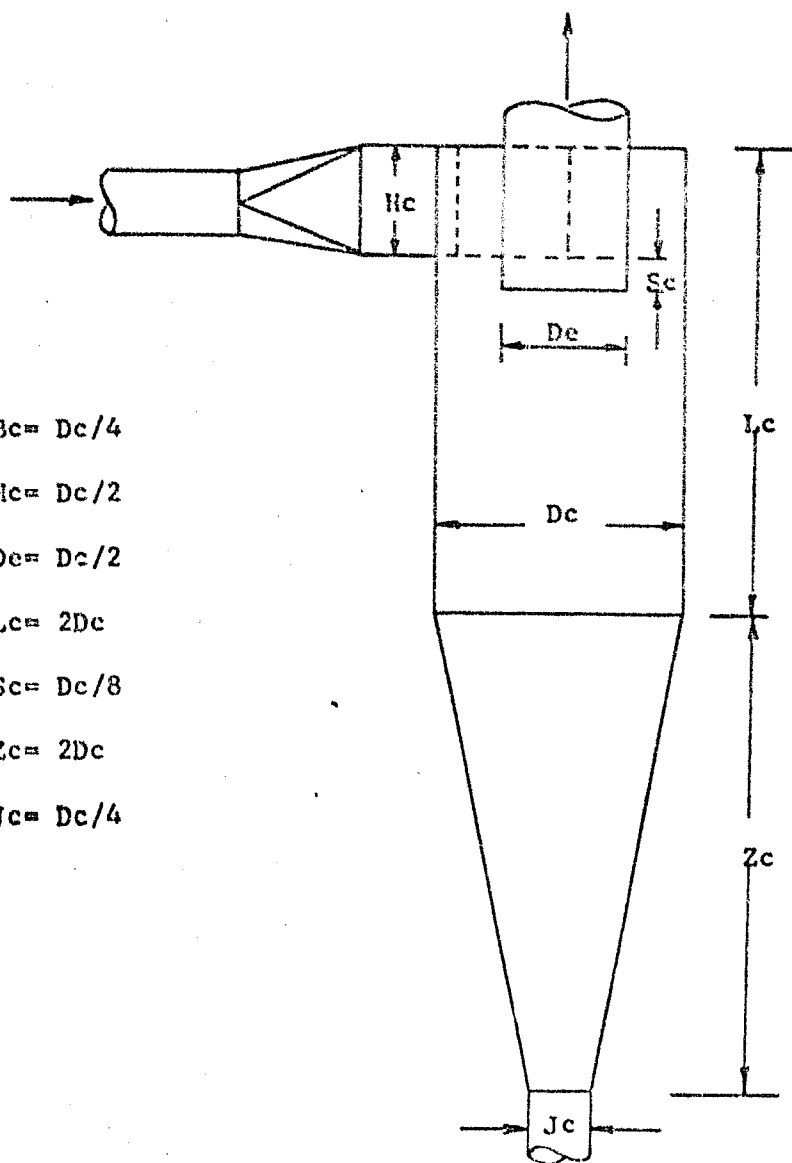
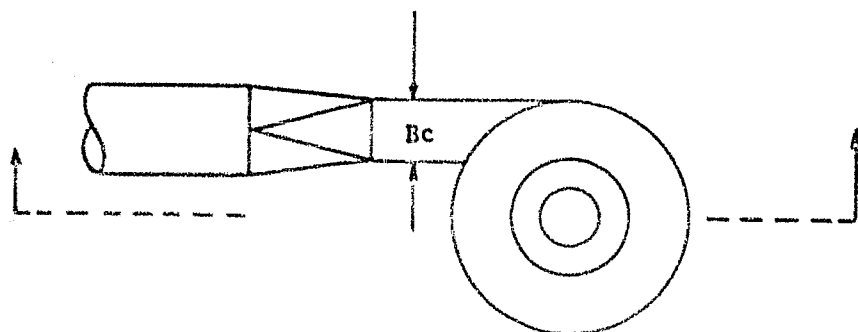
$$D_{pm} = \frac{9 u B_c}{N V (\rho_p - \rho)} \quad ( 2.6 )$$

Aquí:

$N$  : Número de vueltas que da el gas dentro del ciclón (usualmente, este número se toma como 5 )

$B_c$ : Ancho de la entrada rectangular al ciclón.

Las dimensiones de un ciclón "standard" de alta eficiencia están dadas como se muestra en la figura en función de  $B_c$ .



$$B_c = D_c / 4$$

$$H_c = D_c / 2$$

$$D_c = D_c / 2$$

$$L_c = 2D_c$$

$$S_c = D_c / 8$$

$$Z_c = 2D_c$$

$$J_c = D_c / 4$$

fig. 4

La caída de presión debida a la operación de un separador ciclónico se acostumbra dar como una carga de velocidad basada en el área de entrada.

$$h = 0.003 P_s v^2 \quad ( 2.7 )$$

en esta ecuación las unidades son:

$P_s$ : libras sobre el pie cúbico;

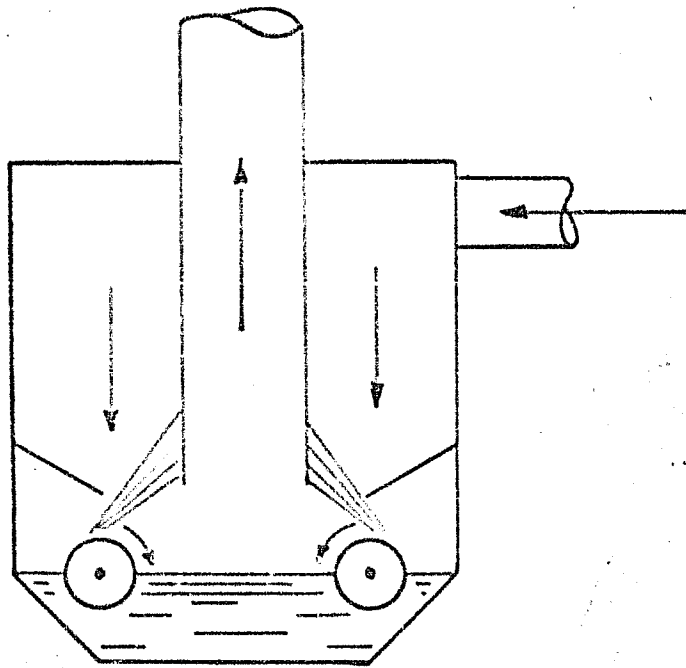
$v$ : pies por segundo.

Existen una gran variedad de ciclones de los más diversos diseños, pero el tipo más común es el ilustrado en la figura; el rango ideal de operación de un ciclón es a alta velocidad y con partículas cuyo diámetro va entre 5 y 200  $\mu$ . Existen otros tipos de separadores por inercia; son importantes los ciclones que utilizan una fase líquida sobre la pared para la retención de polvos, su funcionamiento es más eficiente pero el aire que sale de este equipo va muy humedo; si las partículas forman gomas, sales, substancias ácidas o corrosivas es sumamente peligroso el empleo de la fase líquida, también puede contener la corriente gaseosa vapores o gases que pueden dar lugar a reacciones peligrosas o dañinas al equipo; todo esto es necesario considerarlo en el empleo de una fase líquida para la separación de polvos.

#### DEPURADORES Y LAVADORES

En este tipo de equipo se clasifican los procesos que hacen la limpieza de un gas por medio de la absorción química de las substancias presentes en el gas, la absorción, o simplemente el "lavado" del gas por medio de cortinas de agua. Este último está representado por el dibujo de la figura 5.

Las torres de absorción son el ejemplo más claro de los sistemas de depuración de un gas por medio de la extracción líquido-gas, estos sistemas son ampliamente empleados en los procesos en los cuales se deben eliminar gases y vapores, que además de ser nocivos a la salud de la colectividad, representan un capital recuperable por este medio.



Camara de lavado de gases (8) fig. 5

### FILTROS

Los filtros se dividen en dos grandes grupos generales:

A.- Viscosos: el filtro consta de una red de algún material como algodón, fibra metálica, fibra de vidrio etc., que está humedecido con un líquido viscoso que sirve como adhesivo para el polvo; generalmente es un aceite o una grasa



de alto punto de inflamación y baja volatilidad. Su empleo se ha extendido grandemente debido a que se puede manejar el gas a alta velocidad y que la eficiencia de colección es bastante elevada. Cuando se empaca el filtro se lava con un solvente y así queda completamente limpio, se empapa nuevamente con el aceite y puede volverse a instalar. ( fig 6 )

Un caso particular de los filtros viscosos son aquellos que tienen un funcionamiento continuo, en la figura 7 se ilustra un filtro continuo viscoso. Tiene una banda continua impregnada de aceite, a través de la cual se hace pasar el aire; al terminar el ciclo de operación de la banda, se sumerge en un baño de aceite en el cual se separa el polvo; en el fondo del recipiente de aceite se deposita el polvo que se separa por arrastre con una cuchara.

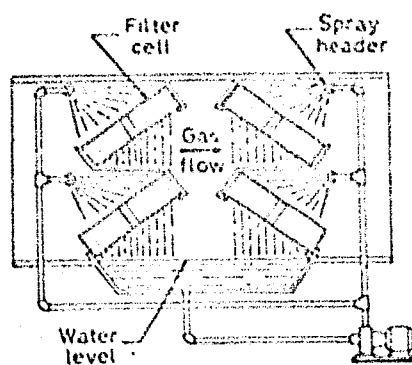


fig. 6

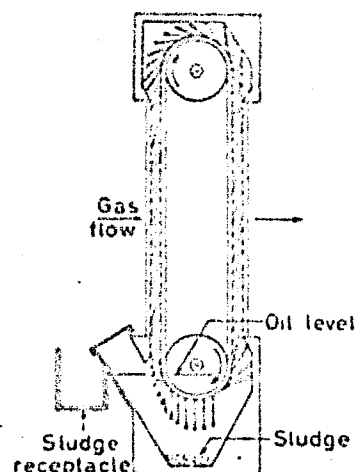


fig. 7

B.- Filtros secos: los filtros que trabajan en seco tienen una eficiencia de colección un poco menor a los húmedos, pueden ser de tela de diversos materiales; de papel, fibra de vidrio, celulosa etc.

Las formas en las cuales se presentan los filtros en la industria -

son los siguientes:

a).- Láminas- la materia filtrante se lamina y se coloca en un soporte rígido para su operación. Este tipo se emplea para bajos flujos, y sus limitaciones son por el área y la caída de presión excesiva.

b).- Falda plegada- El área de filtrado se puede incrementar considerablemente por plegamiento; el filtro puede ser cubierto con una tela delgada y se pliega sobre espaciadores corrugados, proveyendo canales de aire entre las láminas del filtro, de esta manera se incrementa el área de filtración sin aumentar considerablemente el volumen del filtro.

c).- Cerámica porosa- Se emplea como medio filtrante en la industria principalmente para líquidos a los que se les quiere quitar arenas.

d).- Camas empacadas- Cuando se dispone de espacio suficiente el empleo de los lechos empacados con material inerte como coke y materiales especiales de empaque es muy útil ya que el mantenimiento es mínimo y las cantidades de gas por manejar pueden ser bastante grandes.

Las características que debe tener un buen material filtrante son:

- a).- Baja resistencia del flujo de aire;
- b).- Ocupar, en lo posible, el menor volumen;
- c).- Tener resistencia a la tensión, compresión y flexión;
- d).- Ser barato;

e).- Tener alta porosidad, pero no debe obstruirse con facilidad;

Para algunos usos también se requiere:

- a).- Buena resistencia al calor o flama;
- b).- Buena resistencia al ataque químico;
- c).- Adecuada resistencia a la humedad.

Existe un tipo de filtro seco que es muy importante por las aplicaciones que tiene en la industria y por que, además, se puede recuperar el polvo casi en su totalidad.

#### FILTRO DE MANGA

Consiste en bolsas tubulares de tela de 5 a 18 pulgadas de diámetro y de 20 a 30 pies de longitud (fig. 8 ). Las bolsas están suspendidas de la

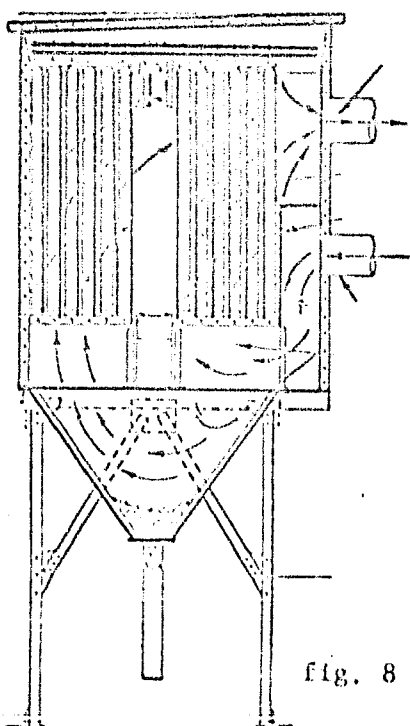


fig. 8

parte superior del aparato; el aire cargado de polvo penetra por dentro de las bolsas y al salir a través del tejido, deja el polvo depositado sobre éste. La acumulación del polvo sobre la tela, gradualmente incrementa la resistencia, y es necesario vibrar la manga para quitar el exceso de polvo; con este objeto, las bolsas están suspendidas sobre una varilla que se hace vibrar, y el polvo se colecta en una tolva en la parte inferior del aparato; después de un período de trabajo

de 4 ó 5 horas se hace un paro de 5 a 10 minutos para vibrar las bolsas y separar el polvo. Cuando las necesidades de la planta no permiten un paro, es necesario tener un sistema doble funcionando en paralelo.

El flujo a través de la tela debe ser laminar. La eficiencia de colección de las bolsas de tela aumenta a medida que la tela retiene mayor cantidad de polvo; pero la caída de presión del sistema se incrementa grandemente. Las condiciones de trabajo normal para un filtro de manga son las siguientes : la velocidad debe ser de 1 a 6 pies por minuto, y la caída de presión del sistema de 2 a 5 pulgadas de agua. En estas condiciones es común encontrar eficiencias de 99.9%.

La caída de presión se calcula por la siguiente ecuación:

$$p = K_0 V_s + K_1 V_s W \quad ( 2.8 )$$

En donde:

$K_0$ : Coeficiente de resistencia de la tela (pulgadas de agua sobre pie cúbico por minuto)

$V_s$ : Velocidad superficial del gas en la tela

$K_1$ : Coeficiente de resistencia para la torta de polvo

$W$  : Peso de polvo coleccionado por unidad de área de filtro

A continuación se dan tablas para  $K_0$  y  $K_1$ . (9)

TELA	TIPO	FABRICANTE	$K_0$
Algodón	F 11	Wellington	0.025
Algodón	F 12	Callaway	0.028
Lana Blanca	E 22	Albany	0.0027
Lana negra	E 21	Pendleton	0.00455
Lana	19 C	Pendleton	0.0091
Vinyon	D 21	Stevens	0.0022
Nylon	C 11	Sears	0.031
Nylon	C 12	Stevens	0.07
Asbesto	A 11	U.S. Ruber	0.01
Orlon	B 21	Stevens	0.012
Orlon	B 22	Stevens	0.014
Orlon	B 23	Stevens	0.021
Orlon	B 24	Burlington	0.036

Polvo

 $K_1$ 

	20 mallas	140ma.	375ma.	90 $\mu$	45 $\mu$	20 $\mu$	2 $\mu$
Granito	1.58	2.20				19.8	
Fundición	0.62	1.58	3.78				
Cal			6.30			18.9	
Feldespató			6.30			27.3	
Piedra	0.96			6.30			

Polvo

K<sub>1</sub>

	20 mallas	140ma.	375ma.	90μ	45μ	20μ	2μ
Negro de humo							47.2
Oxido de zinc							15.7
Madera				6.30			
Resina		0.62				25.2	
Avena	1.58			9.60	11.0		
Maíz	0.62		1.58	3.78	8.80		

El cálculo de un filtro de manga es relativamente muy sencillo con el auxilio de las tablas anteriormente expuestas.

#### PRECIPITADORES ELECTRICOS

En 1905 el Dr. Cottrell dió a conocer el funcionamiento de un separador para partículas sólidas o líquidas de una corriente gaseosa cargada de partículas en suspensión a través de electrodos cargados con un alto potencial de corriente eléctrica; las partículas son atraídas hacia las placas cargadas y una vez depositadas en éstas bajan a una tolva para su separación.

La temperatura de operación puede variar desde atmosférica hasta 1100 ó 1200°F se puede operar hasta una presión de 25 libras por pulgada cuadrada manométrica; practicamente no hay límite en el tamaño de las partículas separadas- el consumo de potencia del aparato es de 3 a 5 Kilowatts por cada 10<sup>6</sup> pies cú-

bicos: la caída de presión del sistema es de menos de media pulgada de agua. Se ha visto que la velocidad de precipitación varía con los diferentes polvos y humos, la concentración y el tamaño de las partículas - son factores determinantes en la descarga y además de la conductividad - del depósito es afectada por la temperatura y la concentración en la corriente. Ya que la velocidad de precipitación determina el tamaño del-precipitador, se deben buscar condiciones de control con baja resistividad y se debe y se debe reducir la erosión con una distribución correcta del gas y por la con figuración de los electrodos. (10)

En corrientes de aire con alto contenido de ácido sulfúrico, la Calco Chemical Division of Americal Cyanamid Co., ha utilizado precipitadores electrostáticos Cottrell modificados, habiendo obtenido un rendimiento de separación hasta de 99% en comparación a los antiguos métodos que - daban una recuperación de 85 a 90%. No solamente se ha eliminado el problema de la contaminación del aire sino que se ha recuperado una gran cantidad de ácido sulfúrico.. (11)

#### PRECIPITADORES SONICOS

En 1860, Kundt descubrió que un sonido puede conglomerar un - aerosol; una condición necesaria es que la concentración de la materia dispersa tenga un mínimo que es del orden de  $2.5 \text{ g/m}^3$ . Al penetrar la - vibración del sonido en el aire las ondas de choque provocan la floculación de las partículas en suspensión; las frecuencias que se emplean normalmente son de 1 a 10 kilos ciclos por segundo y la intensidad del sonido es de 150 decibeles, se emplean con este objeto sirenas que general -

mente operan con vapor de alta presión.



## CAPITULO II

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Lapple & Shepherd; Ind. Eng. Chem. 32, 605 (1948) \*
- 2.- Prandtl & Tietjens; Applied hidro and aeromechanics, McGraw-Hill (1934) \*
- 3.- Wasser; Physik Z., 34, 257 (1933)\*
- 4.- Fletcher; Phys. Rev. 33 (1) 81 (1911) \*
- 5.- Bosanquet, Carey, Steirdmand; Engineering (London) 150, 441 (1940) \*
- 6.- Steinour; Ind. Eng. Chem. 36, 618, 840, 901 (1944) \*
- 7.- Rosin, Ramler, Intelmann; Principles and limits of ciclone-dust removal  
Z. Ver. Deut. Eng. 76, 33-437 (1932)
- 8.- C.C. Hermann; Characteristics of commercial tipos of dust collector chem.  
Eng. April 106 (1946)
- 9.- Mc. Cabe L.C. Air Pollution McGraw-Hill (1952)
- 10.- Schmidt W.A. Dust Collection Chem. Eng. May 308 (1949)
- 11.- King V.L., R.J. Jenny; Don't throw troubles to the winds Chem. Eng. March  
107 (1949)

\* Tomados de Perry J. H.- Chemical Engineers Handbook 3a Ed.

## CAPITULO III

### FILTROS DE ALTA EFICIENCIA

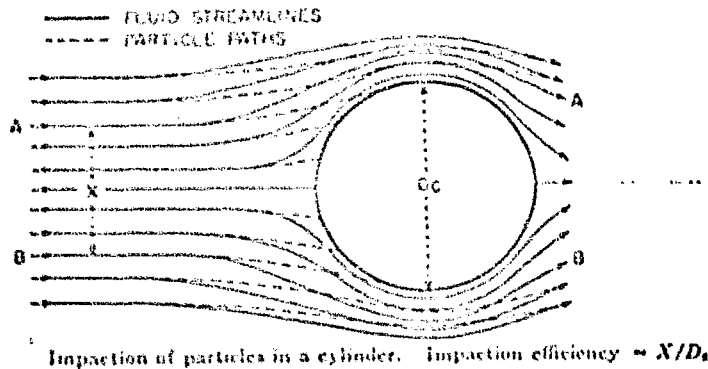
Las modernas necesidades de la industria y en las técnicas de investigación en todos los campos del conocimiento, han hecho necesaria la utilización de aire con un elevado grado de "pureza"; los contaminantes atmosféricos normales como son el polvo y algunos gases y aerosoles son terriblemente dañinos en industrias alimenticias, de instrumentos, laboratorios de investigación, plantas atómicas etc. Los sistemas de purificación han tenido que ser modificados y las técnicas empleadas en la descontaminación atmosférica depuradas.

Uno de los sistemas más modernos y a la vez económicamente accesibles para la realización de este servicio, es el empleo de la filtración del aire a través de medios fibrosos; ejemplo de éstos son la lana cardada, la fibra de asbesto, la celulosa y actualmente las fibras sintéticas como la fibra de vidrio.

Es preciso un detallado análisis teórico del proceso de filtración a través de filtros fibrosos; para poder comprender con amplitud las cualidades de este sistema.

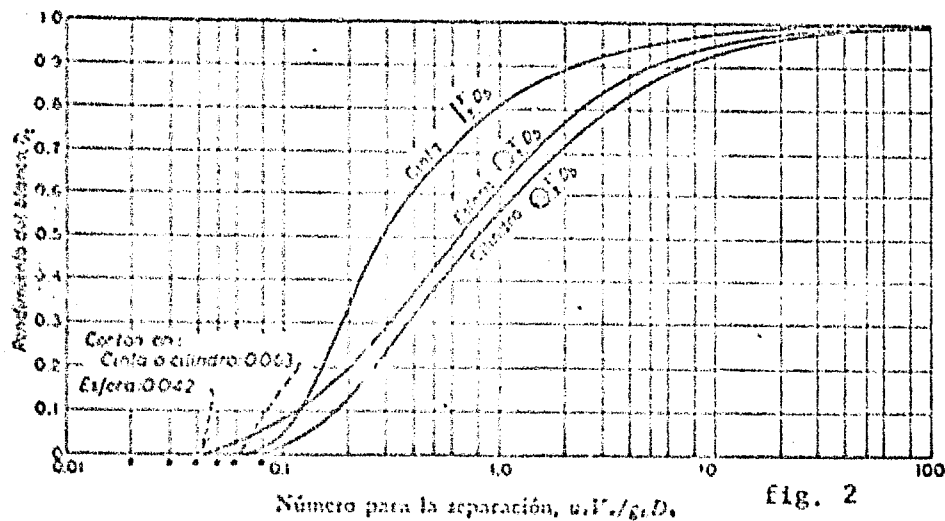
Cuando una corriente gaseosa cargada de polvo choca con un obstáculo, el fluido se desvía siguiendo el contorno del cuerpo, pero las -

partículas en suspensión en el gas, debido a su diferente densidad tien  
den a continuar con la trayectoria análoga a la de la figura. (1)



Las partículas debido a la inercia que llevan, sufren un impac  
to con el obstáculo que se le interpone en su camino, y son detenidas so  
bre él. Se conoce como eficiencia de impacto a la relación que existe-  
entre las líneas de flujo "A" y "B" y el diámetro del obstáculo en la -  
corriente.

Langmuir y Blodgett (1) han hecho una correlación para la efi-  
ciencia de impacto de las partículas suspendidas en una corriente gasec-  
sa en función de la velocidad terminal de sedimentación de las propias -  
partículas y otras variables que se dan a continuación ( fig 2 ).  
Estos investigadores han graficado los valores de la eficiencia de impac  
to para figuras geométricas diferentes como son cintas, esferas y cilin-  
dros.



Las variables representadas en esta gráfica son:

$D_b$ : Diámetro del obstáculo en la corriente;

$g$ : Aceleración debida a la gravedad;

$u_t$ : Velocidad terminal de sedimentación libre de las partículas en suspensión en la corriente gaseosa;

$V_0$ : Velocidad media relativa entre el fluido y el obstáculo;

$n_t$ : Eficiencia de impacto  $x / D_b$

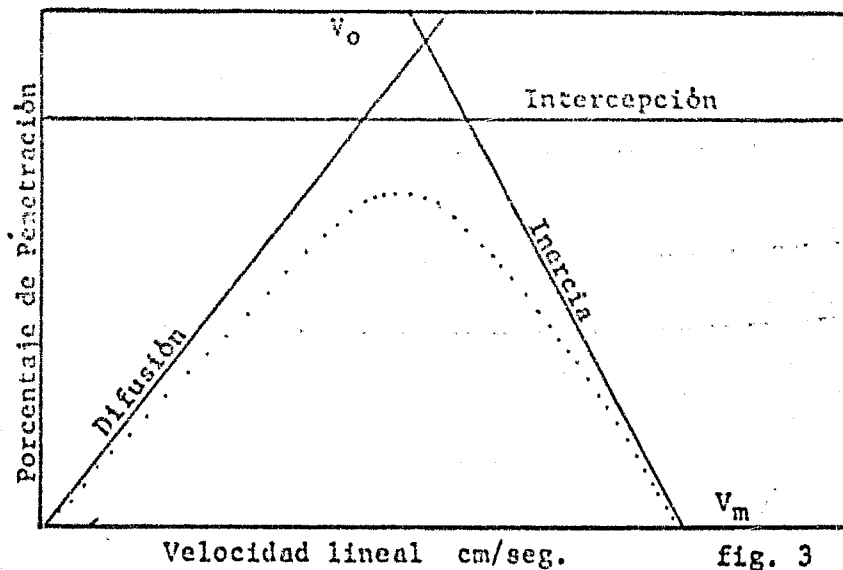
Aunque estas gráficas han sido deducidas de condiciones de flujo laminar, pueden ser aplicadas a flujos turbulentos sin introducir un error de consideración en los resultados.

### INTERCEPCION

Para unas condiciones dadas del filtro y las partículas, se considera que el fenómeno de intercepción es constante e independiente de la velocidad en el filtro; al incrementarse el diámetro de partícula, la línea que representa el fenómeno, se mueve hacia abajo en la gráfica. Si aumenta el diámetro de-

fibra la línea se moverá hacia arriba en la gráfica; lo mismo ocurre al aumentar el espacio entre las fibras que constituyen el filtro.

Una representación del mecanismo de la filtración, ha sido propuesto por Ramskill y Anderson (2); y en él se presentan tres fenómenos diferentes: difusión, intercepción e inercia.



En la figura, la línea punteada representa el comportamiento real de un sistema influido por los tres factores considerados.

#### DIFUSION

Las partículas pequeñas menores de  $1 \mu$ , están sujetas al movimiento Browniano que hace que se difundan a través de la corriente en que se encuentran; este movimiento se incrementa a medida que la partícula se hace -

menor, aumentando la probabilidad de que una partícula choque con una fibra y se captada por ésta por fuerzas gravitacionales de Van der Waals; sobre este razonamiento Freundlich (3) ha pensado que los filtros deben ser más eficientes para partículas cada vez más pequeñas.

La difusión está representada por una línea inclinada de pendiente constante, si el radio de la fibra aumenta la línea se desplazaba hacia la derecha, o sea que el fenómeno de difusión seguirá teniendo influencia aún a una mayor velocidad de la corriente gaseosa; si el diámetro de la partícula aumenta, el movimiento Browniano sobre ésta será cada vez menos perceptible, y como el fenómeno de la difusión se debe principalmente a este efecto disminuirá considerablemente la difusión moviéndose la curva hacia la izquierda; si la distancia entre las fibras aumenta la probabilidad de captación de una partícula, disminuye y por lo tanto la difusión es menor y la línea que representa el fenómeno se desplaza hacia la derecha, siendo necesaria mayor velocidad para que exista penetración.

#### INERCIA

La línea representativa de la inercia va de un punto  $V_0$  que es la velocidad en que se considera que empieza a ser notable la influencia de la inercia, hasta un punto terminal  $V_m$ , arriba del cual ya no existe influencia notable por el incremento de velocidad. A medida que el radio de partícula aumenta la influencia de la inercia es mayor, consecuentemente la línea se desplaza hacia la izquierda; si la densidad de las partículas aumenta, consecuentemente aumentará su inercia, la curva se moverá hacia la izquierda. Si el diámetro de la fibra aumenta, la curva se desplaza hacia la derecha.

EFICIENCIA DE COLECCION

Supongamos un filtro de area unitaria normal al flujo, de un espesor  $L$ , tomemos un radio de fibra  $r_f$  y una densidad de empaque  $b$ , la cual se define como:

$$b = \frac{\text{volúmen de fibra}}{\text{vol. total de filtro}}$$

Sea  $Q$  el volúmen de aire que fluye por segundo; la velocidad media a través del filtro será:

$$v_a = \frac{Q}{A(1-b)} \quad (3.1)$$

La longitud equivalente de fibra para un volúmen unitario de filtro se expresa como sigue:

$$L_e = \frac{b}{\pi r_f^2} \quad (3.2)$$

La eficiencia de impacto de una fibra aislada, ha sido propuesta como:

$$n_t = \frac{x}{2 r_f} = \frac{x}{D_b} \quad (3.3)$$

La variación de la concentración de partículas en una corriente gaseosa se define por la siguiente ecuación diferencial:

$$-\frac{dn}{n} = \frac{x Va b dL}{Q r_f^2} = \frac{x b dL}{(1-b) r_f^2} \quad (3.4)$$

$\frac{x}{2r_f}$  se definió como la eficiencia de una fibra representativa y no es necesariamente igual en valor al de una fibra aislada.

Integrando la ecuación ( 3.4 ) tenemos:

$$-\ln \frac{n}{n_0} = \frac{x b L}{(1-b) r_f^2} \quad (3.5)$$

Substituyendo  $\frac{x}{2r_f}$  como " Y " ( Eficiencia de fibra para filtro unitario ) obtenemos:

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{2 y b L}{(1-b) r_f^2}} \quad (3.6)$$

Aquí  $n$  representa la concentración de partículas que han penetrado el filtro, y  $n_0$  la concentración inicial en la corriente.

De aquí podemos obtener una ecuación básica para la filtración a través de un filtro fibroso como sigue:

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - e^{-ym} \quad (3.7)$$

En la que  $\frac{n_0 - n}{n_0}$  es la eficiencia de colección del filtro,



y " $y_m$ " es el índice de filtración de la substancia de la cual está hecho el filtro.

$$y_m = - \frac{2 y b L}{(1-b) \pi r_f} \quad (3.8)$$

Las consideraciones más importantes para el diseño de filtros fibrosos son la caída de presión y la eficiencia de colección.

Un filtro que actúe únicamente como malla, tiene excesiva caída de presión y un tiempo de vida por obstrucción demasiado corto.

Los filtros fibrosos en la práctica, tienen alta porosidad y la distancia entre sus fibras es muy alta en comparación al tamaño de las partículas.

#### EFICIENCIA DE COLECCION DE UN CILINDRO AISLADO

Se define como la sección de la corriente para la cual las partículas son separadas con relación al área proyectada por el colector en la dirección del flujo.

$$\frac{d(m_p \vec{u})}{d\theta} = \vec{F}_e - \frac{(\vec{u} - \vec{v})}{z} \quad (3.9)$$

En donde:

$m_p$ : masa de partícula;

$\vec{F}_e$ : vector suma de las fuerzas externas;

$z$ : movilidad;

$-\frac{(\vec{u}-\vec{v})}{z}$ : fuerza de fricción que se opone al movimiento de la partícula;

$\vec{u}$  : velocidad de partícula:

$\vec{v}$  : velocidad del gas

$$z = \frac{C}{3\pi\mu D_p} \quad (3.10)$$

C : Factor de Cunningham para partícula cuyo diámetro es del orden del camino libre medio de las moléculas.

En ausencia de fuerzas externas, la ecuación ( 3.9 ) toma la forma siguiente, cuando la ley de Stokes es aplicable

$$\frac{C \rho_p D_p^2}{18 \mu} = - (\vec{u} - \vec{v}) \quad (3.11)$$

Expresado esto en coordenadas rectangulares para que sea adimensional tenemos:

$$2\psi \frac{d^2 \bar{x}}{d\theta^2} + \frac{d\bar{x}}{d\theta} - \bar{v}_x = 0 \quad (3.12)$$

$$2\psi \frac{d^2 \bar{y}}{d\theta^2} + \frac{d\bar{y}}{d\theta} - \bar{v}_y = 0$$

En donde:

$$\psi = \frac{C \rho_p D_p^2 v}{18 \mu D_f}$$

$$\bar{x} = \frac{2x}{D_f} \bar{y} = \frac{2y}{D_f}$$

$$\bar{v}_x = \frac{\bar{v}_x}{v_0} \bar{v}_y = \frac{v_y}{v_0}$$

$$\bar{\theta} = \frac{2 v_0 \theta}{D_f}$$

El parámetro de inercia  $R$  representa la relación de la fuerza necesaria para detener una partícula con una velocidad  $v_0$  en una distancia  $D_f$   $\frac{z}{2}$

Debido a la complejidad de las ecuaciones ( 3.12 ) no se han obtenido sus soluciones. Las trayectorias de las partículas se deben obtener por solución numérica de la ecuación.

La fig. 4 muestra los resultados obtenidos por Davies calculados de su ecuación empírica.

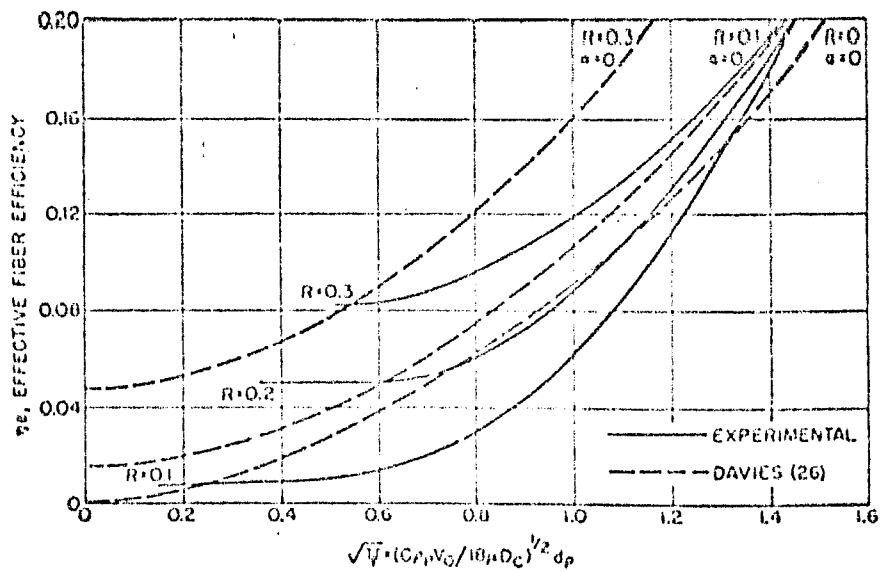


fig. 4

Langmuir y Blodgett, y Stairmand dan un valor crítico para  $\psi$  de 1/16, abajo del cual no hay colección por inercia en un cilindro; otros autores proponen otros valores, pero no hay ninguna razón para tomar un determinado valor.

Substancialmente no importa si  $\psi$  tiene o no un valor mínimo crítico, ya que a bajos valores de  $\psi$  la filtración es controlada por otro mecanismo.

#### COLECCION POR INTERCEPCION DIRECTA

Una partícula carente de masa no tendrá inercia, y su centro seguirá las corrientes del fluido. Si la partícula tiene un diámetro  $D_p$ , ésta tocará el colector si su centro se aproxima a éste una distancia  $D_p/2$  de la superficie colector. Este fenómeno se llama intercepción directa.

La máxima colección posible es:

$$1 + \frac{D_p}{D_f} \quad \text{ó} \quad 1 + R \quad (3.13)$$

Ranz (4) ha mostrado que la eficiencia de colección se dá por la siguiente expresión :

$$n_o = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \quad (3.14)$$

La siguiente ecuación nos dá la velocidad tangencial para  $\alpha = \pi/2$

$$\left( v_o \right)_{\pi/2} = \dot{c}_L \left[ 2 \ln \left( \frac{r}{r_1} \right) + \left\{ 1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right\} \right] \quad (3.15)$$

El flujo volumétrico  $Q$  que pasa por el plano a  $90^\circ$  limitado por  $r = r_f$  y  $r = r_f + D_p/2$  por unidad de longitud de cilindro es:

$$Q = \int_{r_f}^{r_f + D_p/2} v_o \, dr = \frac{C_L D_f}{2} \left[ 2 (1 + R) \ln(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1+R} \right] \quad (3.16)$$

Asumiendo que las partículas no tienen masa;  $2Q/v_o D_f$ , el flujo por un plano que representa la mitad del área proyectada por unidad de longitud de cilindro, es la eficiencia de intercepción.

$$n_o = \frac{1}{2 (2 - \ln R_e)} \left[ 2 (1+R) \ln (1+R) + \frac{1}{1+R} \right] \quad (3.17)$$

Esta ecuación fué derivada por Langmuir (5)

#### COLECCION POR DIFUSION BROWNIANA

Einstein (6) demostró estadísticamente que la desviación media cuadrática de una partícula está relacionada con su coeficiente aparente de difusión por:

$$\frac{\bar{x}^2}{t} = 2 D_{AB} \theta \quad (3.18)$$

El coeficiente de difusión lo dió Einstein en función de la ley de Stokes

$$D_{AB} = \frac{C k T}{3 \sqrt{1} \mu D_p} \quad (3.19)$$

En donde:

$k$  : constante de Boltzmann;

$T$  : Temperatura absoluta;

$C$  : Factor de corrección Cunningham.

Langmuir (7) ha calculado el recorrido medio estadístico para una partícula en la dirección  $x$  y el tiempo  $\theta$

$$x = \left[ \frac{4}{\pi} D_{AB} \theta \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Al pasar una partícula cerca de una fibra sufrirá una atracción; el tiempo que toma la partícula en pasar de un punto  $\pi/6$  en relación a la fibra y la corriente, hasta otro  $5\pi/6$  es lo que se denomina "tiempo efectivo" se considera que durante él ocurre la difusión de la partícula hacia la fibra. El punto más cercano de la trayectoria de la partícula a la fibra se localiza a un ángulo  $\pi/2$  de la dirección del fluido y el espacio comprendido se le denomina  $x_0$  y es de gran utilidad para la denominación del "tiempo efectivo" y la "distancia efectiva" que es aquella en la cual se efectúa la difusión.

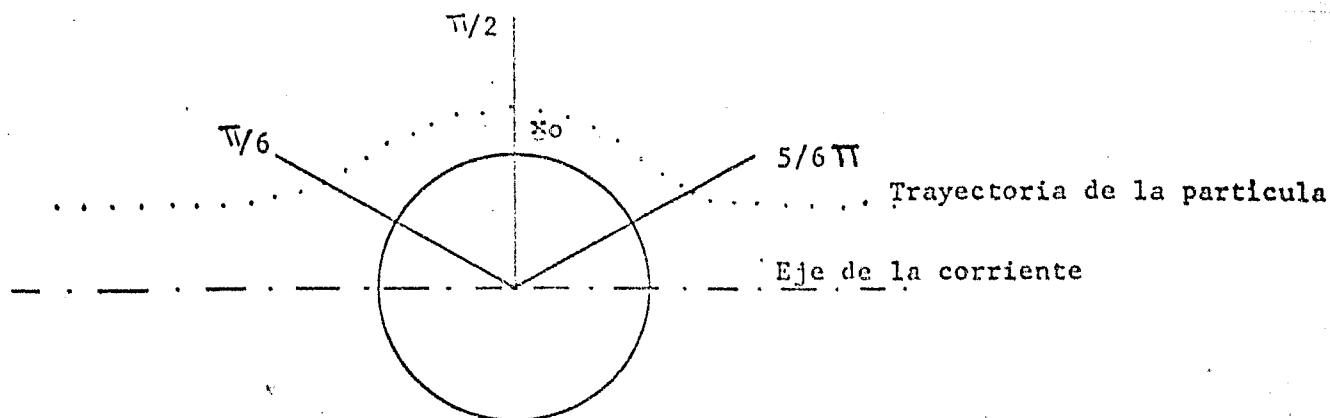


fig. 5

Langmuir ha calculado para la distancia efectiva y el tiempo efectivo

$$x_e = 1.120 x_o \quad (3.21)$$

$$\theta_e = 0.139 \frac{D_f^2}{C_L x_o} \quad (3.21)$$

Substituyendo estas 2 en ( 3.20 ) se obtiene una solución para  $x_o$

$$\frac{x_o}{D_f} = \frac{1}{2} \left[ 1.12 \frac{D_{AB}}{C_L D_f} \right]^{1/3} \quad (3.22)$$

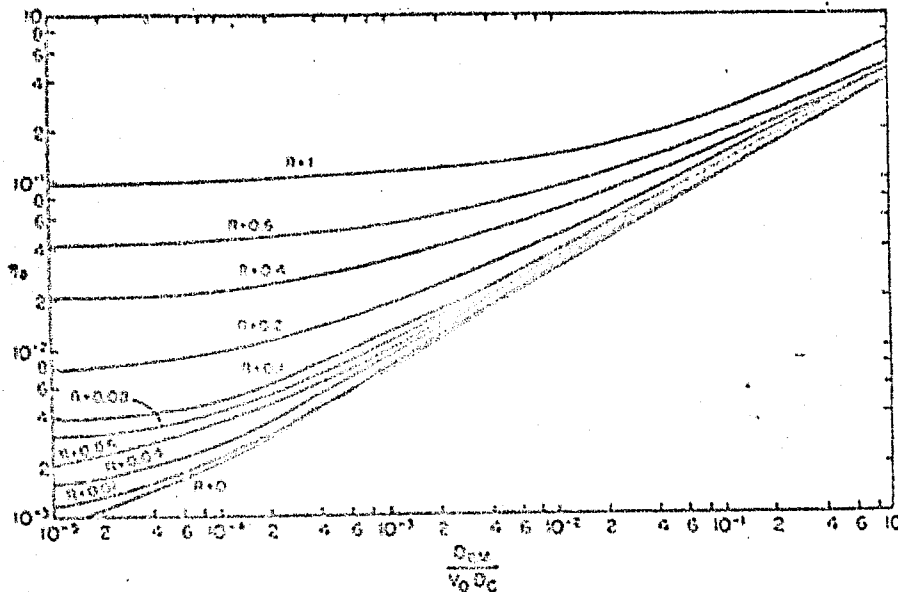
Langmuir da una tolerancia a esta ecuación de  $\pm 20\%$

Como corolario de estas consideraciones Langmuir propone su ecuación para eficiencia por difusión.

$$n_o = \frac{1}{2 (2 - \ln R_e)} \left[ 2 \left(1 + \frac{2 x_o}{D_f}\right) \ln \left(1 + \frac{2 x_o}{D_f}\right) - \frac{(1+2x_o)}{D_f} + \frac{1}{1 + \frac{2x_o}{D_f}} \right]$$

( 3.23 )

La figura 6 muestra la eficiencia de colección para  $R_e = 10^{-2}$



Calculated collection efficiency of an isolated cylinder by diffusion and interception (based on Langmuir's theory,  $Re = 10^3$ ).

Fig. 6

Johnstone y Roberts (8) y Ranz (4) han propuesto una analogía con las transferencias de masa y calor.

$$\frac{D_f}{B_f} = \frac{1}{\pi} + 0.55 \left( \frac{D_f v_o}{D_{AB}} \right)^{1/3} \left( \frac{D_f v_o}{\mu} \right)^{1/6} \quad (3.24)$$

En donde:

$D_f/B_f$  : Número de Nusselt (Nu) para transferencia de masa

$B_f$  : Coeficiente de película para transferencia ficticia de masa

La eficiencia de colección para un cilindro por difusión da la siguiente ecuación:



$$n_o = \overline{N} \left( \frac{D_{AB}}{v_o D_f} \right) \quad (\text{Nu}) \quad (3.25)$$

No hay datos experimentales que corroboren esta ecuación aunque los valores teóricos son concordantes con la ecuación de Langmuir.

#### COLECCION POR ASENTAMIENTO

Las partículas grandes se detienen en las superficies colectoras por asentamiento debido a la gravedad. Ranz (4) ha mostrado que la eficiencia de colección está dada por la relación entre la velocidad de asentamiento libre - de la partícula y la velocidad de la corriente.

$$n = \frac{u_s}{v_o} = \frac{C D_p^2 \rho_p g}{18\mu v_o} \quad (3.26)$$

#### COLECCION POR INERCIA E INTERCEPCION

Davies ha estudiado los efectos unidos de la intercepción y la inercia para obtener la eficiencia y ha mostrado que es función de  $\Psi$ ,  $R_e$  y  $R$ ; ha experimentado para  $R_e = 0.2$  y obtuvo una ecuación.

$$n = 0.16 \left[ R + (0.50 + 0.8 R) \Psi - 0.1052 R \Psi^2 \right] \quad (3.27)$$

La fig. 4 muestra la eficiencia de colección calculada por la ecuación anterior.

La eficiencia de los 2 fenómenos juntos es mayor que la suma de cada uno de estos por separado.

### EFICIENCIA TOTAL DE COLECCION

Davies (9) propone encontrar la eficiencia total de colección por el siguiente procedimiento:

I.- Calcular los parámetros  $\psi$  de inercia,  $D$  de difusión y  $R$  de intercepción.

II.- Hacer la suma de  $\psi$  y  $D$

III.- Determinar la eficiencia de inercia e intercepción por medio de la curva de la figura 4 para los valores característicos de  $\psi$  y  $R$

Considerando un régimen permanente para el proceso de filtración se puede establecer la siguiente ecuación diferencial:

$$D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right] - \left[ \frac{\partial (U_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (U_y N)}{\partial y} \right] = 0 \quad (3.28)$$

La solución analítica de esta ecuación es generalmente imposible; pero convirtiéndola a una forma adimensional se puede determinar los parámetros que determina la concentración de partículas alrededor de un cilindro.

Se demuestra por análisis matemático que:

$$n_o = f(\psi, R, D, R_e) \quad (3.29)$$

El valor de la ecuación de la eficiencia total del sistema se calcula por un diseño de experimentos y un sistema de regresión múltiple para determinar la ecuación particular para cada sistema.

Cuando  $\gamma$  ó  $D$  son pequeños se puede calcular la eficiencia como la suma de las eficiencias de los fenómenos combinados de inercia-intercepción y -difusión-intercepción.

### RESISTENCIA EN LECHOS FIBROSOS

La ecuación básica para el flujo a través de lechos porosos es la ecuación de Darcy que se expresa de la siguiente manera:

$$p = \frac{k_1 \mu L Q}{A} \quad ( 3.30 )$$

En la cual  $p$  es la caída de presión a través de la cama y las siguientes variables son:

- $k_1$ : Constante
- $\mu$ : Viscosidad del fluido
- $L$ : Espesor de la cama
- $Q$ : Gasto volumétrico
- $A$ : Área normal al flujo

Para filtros fibrosos, Sullivan y Hertel (10) han modificado la ecuación y han obtenido otra que se da a continuación:

$$p = \frac{k_2 \mu Q L S_o^2 (1-c)^2}{k_3 A c^3} \quad ( 3.31 )$$

En donde los símbolos adicionales son:

- $k_2$ : Factor de forma
- $S_o$ : Superficie específica expuesta al flujo

$c$ : Porosidad de la cama;  $c = 1 - b$ , en donde  $b$  es la densidad de empaque

$k_3$ : Factor de orientación; 1 para flujo paralelo y 0.5 para flujo transversal a las fibras

Sullivan y Hertel han descubierto que  $k_2$  no es constante como ellos suponían y han encontrado que tiene un valor de 4 para  $c = 0.8$  y para  $c = 0.98$  el valor de  $k_2$  es de 20.

Davies (9) ha encontrado que cuando el número de Reynolds es menor de 1 existe una correlación que es función a su vez de la densidad de empaque.

$$\frac{4 p A r_f^2}{\mu Q L} = F ( b ) \quad ( 3.32 )$$

Sobre una serie de experiencias en diversos materiales, Davies ha evaluado la función de  $b$  y ha encontrado lo siguiente:

$$F ( b ) = 64 b^{1.5} ( 1 + 56 b^3 ) \quad ( 3.33 )$$

Tomando en cuenta ésta expresión, la anterior queda:

$$p = \frac{64 \mu Q L b^{1.5} ( 1 + 56 b^3 )}{4 A r_f^2} \quad ( 3.34 )$$

Conociendo las condiciones de operación de un sistema dado, es posible calcular por medio de esta ecuación el radio medio efectivo de la fibra con la que se está trabajando. Una modificación de la ecuación anterior y que es más útil para la determinación experimental del radio de la fibra es la que se

presenta a continuación:

$$r_f^2 = \frac{17.5 b^{1.5} \mu v (1 - b) L (1 + 52 b^{1.5})}{p} \quad (3.35)$$

Langmuir ha hecho una correlación, suponiendo a las fibras que constituyen al filtro como cilindros, y ha calculado la caída de presión a partir de la resistencia al flujo por el espacio entre éstos. Un filtro real no tiene sus fibras en una misma dirección, y es por esta razón que se ha incluido un factor de corrección  $B$ , que varía de 0.5 para una muy mala distribución de las fibras, hasta 1.5 para una distribución perfecta transversal al flujo.

$$p = \frac{4 B \mu b \phi Q L}{A r_f^2} \quad (3.36)$$

En donde:

$$\phi = (-\ln b + b^2/2 - 3/2)^{-1} \quad (3.37)$$

Lamb (11) se ha basado para sus consideraciones, en el efecto de "arrastre" (Drag theory) para cilindros de radio  $r_f$ , transversales al flujo él considera que existe una fuerza de arrastre sobre una unidad aislada de fibra de radio  $r_f$  y establece:

$$f_D = 8 \pi \mu C_L \quad (3.38)$$

En donde:

$$C_L = \frac{v_0}{2 (2 - \ln Re)} \quad (3.39)$$

Arreglando estas ecuaciones en términos del coeficiente de arrastre ,  
tenemos:

$$f = C_D \rho v^2 r_f \quad ( 3.40 )$$

Chen (12) ha estudiado ampliamente las consideraciones de los investig anteriormente citados y a su vez a propuesto una ecuación para la caída de presión a través de un filtro construido de material fibroso.

$$p = \frac{b \rho v^2 L C_{Db} r_f}{\pi (r_f)^2} \quad ( 3.41 )$$

En donde:

$C_{Db}$  : Coeficiente de arrastre para fibra con radio medio  $r_f$  y densidad de empaque  $b$

Chen propone una correlación para el estudio de las fibras como medio filtrante y la presenta en la siguiente forma:

$$\frac{C_{Db} Re}{2} = \frac{k_3}{\ln ( k_4 b + 0.5 )} \quad ( 3.42 )$$

$k_3$  y  $k_4$ , son dos constantes que pueden ser facilmente determinadas por medio de un sistema experimental.

Con el objeto de corroborar sus propias investigaciones Chen modificó las correlaciones de los diversos investigadores, para darles una forma análoga a las ecuaciones determinadas por él mismo; habiendo obtenido las siguientes ecuaciones de los investigadores citados.

Sullivan y Hertel

$$\frac{C_{Db} Re'}{2} = \frac{4\pi k_2 b}{(1-b)^2} \quad (3.43)$$

Davies (primera ecuación)

$$C_{Db} Re' = 16\pi (1-b) b^{0.5} (1+56 b^{1.5}) \quad (3.44)$$

Davies (segunda ecuación)

$$\frac{C_{Db} Re'}{2} = 17.5\pi (1-b) b^{0.5} (1+52 b^{1.5}) \quad (3.45)$$

Langmuir

$$\frac{C_{Db} Re'}{2} = 4\pi b (1-b) \phi \quad (3.46)$$

Chen

$$\frac{C_{Db} Re'}{2} = \frac{k_3}{\ln(k_4 b^{0.5})} \quad (3.47)$$

En todas estas ecuaciones se ha empleado un número de Reynolds modificado, este número ha sido calculado con la velocidad media en el seno del filtro.

$$Re' = \frac{Re}{(1-b)} \quad (3.48)$$

Se muestra a continuación una tabla que fue calculada por Chen aplicando las ecuaciones anteriores.

$\delta$	Sullivan y Hertel	Davies 1a.	Davies 2a.	Langmuir	Chen
0.001	0.057	1.58	1.73	2.32	2.08
0.005	0.282	3.53	3.86	3.30	2.84
0.01	0.575	4.95	5.42	4.00	3.38
0.05	3.14	10.60	12.00	7.46	6.09
0.1	6.95	15.10	18.20	11.40	9.17
0.15	11.80	19.60	26.20	15.60	13.20
0.25	25.20	35.40	54.40	26.60	29.20

Como se puede observar aquí, existen variaciones bastante considerables entre los resultados obtenidos por una u otra fórmula; los resultados obtenidos por la aplicación de las ecuaciones de Langmuir y Chen son bastante aproximados, ahora, si se toma en cuenta que Chen utilizó un valor de 1 para la constante B de la ecuación de Langmuir y que esta puede variar entre 0.5 y 1.5, podemos considerar que las ecuaciones de Langmuir y Chen darán resultados prácticamente iguales. Es muy importante observar que la determinación del radio de la fibra por la utilización de estas ecuaciones, nos da únicamente un radio medio estadístico del filtro y de ninguna manera el radio preciso de la fibra.



En los sistemas biológicos la "esterilización" del aire es un problema de vital importancia. Humphrey y Deindoerfer (13) han observado que la penetración de micro-organismos a través de camas fibrosas decrece exponencialmente con el incremento de espesor del lecho.

$$\log. \frac{N_1}{N_2} = \frac{k L}{2.3} \quad ( 3.49 )$$

En esta ecuación las variables son las siguientes:

$N_1$  : Partículas que entran al filtro

$N_2$  : Partículas que salen del filtro

$k$  : Constante de filtración,  $F ( V, C, D_F, D_p, \rho_p )$

$L$  : Espesor del filtro

En los procesos microbiológicos de esterilización de aire la penetración a través de un filtro se acostumbra dar como el espesor de filtro necesario para detener el 90% de los micro-organismos presentes en la corriente.

La definición de "esterilidad" es una utopía; ya que para obtener un aire exento absolutamente de seres vivos sería necesario un espesor infinito de filtro, es por esta razón que la esterilidad se debe dar como la probabilidad que existe para que un micro-organismo atraviese el filtro ( probabilidad de infección ).

La siguiente ecuación nos da la relación para el espesor de un filtro respecto al espesor de aquél para el cual son detenidos el 90% de los micro-organismos presentes.

$$\log. \frac{N_1}{N_2} = \frac{L}{L_{90}} \quad ( 3.50 )$$

$L_{90}$  como  $k$  es una función de la velocidad del aire, la porosidad del filtro, el diámetro de la fibra, el diámetro de la partícula y la densidad de partícula.

Al variar la velocidad de la corriente a través del filtro la penetración presenta un valor máximo que decrece al seguir aumentando la velocidad. El punto de operación de un filtro se estima de tal manera que la eficiencia de colección sea lo mas alta posible, teniendo como limitaciones la caída de presión y la posibilidad de arrastre mecánico de las fibras por la corriente.

Es muy importante al proyectar un sistema de filtración, diseñar el filtro para su punto crítico de operación; en las condiciones normales de trabajo la eficiencia requerida estará en exceso, pero es indispensable conservar la seguridad necesaria en el punto crítico.

Para la eficiencia crítica en un filtro, Humphrey y Deindoerfer proponen la siguiente ecuación:

$$L_{90} = \frac{0.79 (1-b) D_f}{b (1+4.5 b) n_0} \quad ( 3.51 )$$

A esta eficiencia corresponde también una velocidad crítica que está dada por la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{1.125 \mu D_f}{C \rho_p D_p^2} \quad ( 3.52 )$$

En donde:

$C$  : Factor de Cunningham y las otras variables han sido mencionadas anteriormente.

La gráfica presentada a continuación representa el comportamiento de un filtro hecho con fibra de vidrio, fabricado por la Hurburt Paper Co. Este está fabricado de fibra de 0.5 $\mu$  unidas con resina.

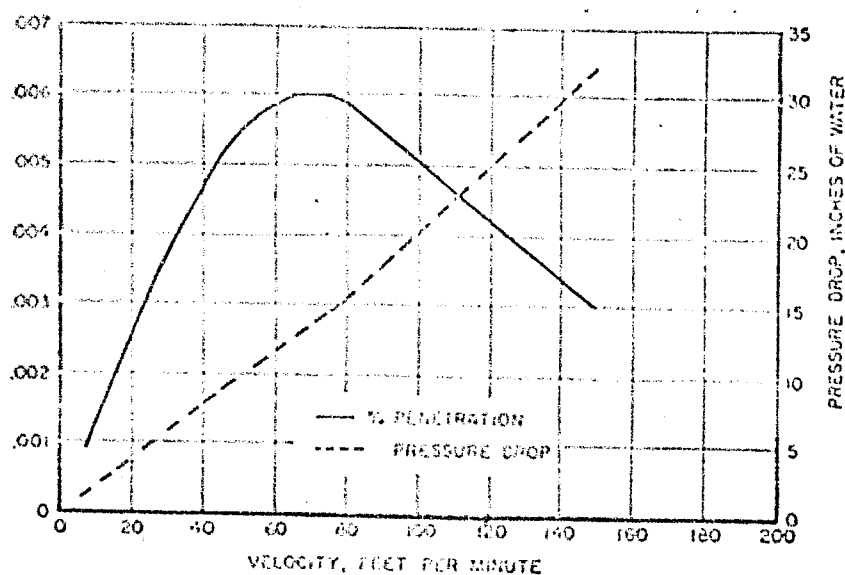


fig. 7

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Contaminante : D.O.P.

Tamaño de partícula: 0.3 $\mu$

Concentración: 0.04 g/ m<sup>3</sup>

Para el manejo eficiente de corrientes contaminadas es necesario saber las concentraciones, el diámetro estadístico de partícula, la densidad de partícula y habiendo fijado el porcentaje de tolerancia deseado, con una gráfica representativa del filtro es muy accesible su diseño.

## CAPITULO III

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Langmuir y Blodgett, U.S. Army Technical Report. No. 5418, feb. 19, 1946
- 2.- Ramskill y Anderson, J. Colloid Science, 6 (1951) 416
- 3.- Freundlich H., Colloid and Capillary Chemistry, 1926 London; Methuen
- 4.- Ranz E.W. Tech. Report No. 3, Contract AT-30-3-28 University of Illinois (1951)
- 5.- Langmuir O.S.R.D. Report No. 865 (1942)
- 6.- Einstein A. Ann. Physik 17, 549 (1905); 19, 371 (1906)
- 7.- Idem 5
- 8.- Johnstone H.F. Roberts M.H. Ind. Eng. Chem. 41, 2417 (1949)
- 9.- Davies C.N. Proc. Inst. Mech. Engrs. (London) B1, 185 (1952)
- 10.- Sullivan R. Hertel K. Advances in Colloid Science (1942) New York Interscience
- 11.- Lamb H. Hydrodynamics (1932) London Cambridge University Press.
- 12.- Chen C. Y. Filtration of Aerosols by Fibrous Media (1955) University of Illinois
- 13.- Humphrey A.E. Deindoerfer H. Optimal Design of Fibrous Filters for Air Sterilization; Folia Microbiologica vol. VI ( 1961 )

## CAPITULO IV

EXPERIMENTACION

Para verificar la teoría de filtración anteriormente expuesta, se hicieron pruebas de laboratorio con filtros contruidos de fibra de vidrio, con una fibra de 4 micras nominales y un espesor de filtro de una pulgada. Este material me fue proporcionado por la compañía Fiberglass de México, S.A. y la fibra fue fabricada por Vitro Fibras, S.A.

Se realizaron pruebas con diferentes polvos tales como caolín y alúmina las condiciones de arrastre se encontraron óptimas para carbonato de calcio impalpable que me fue proporcionado por la compañía Yeso Universal, S.A.

El sistema de prueba se diseñó de la siguiente manera:

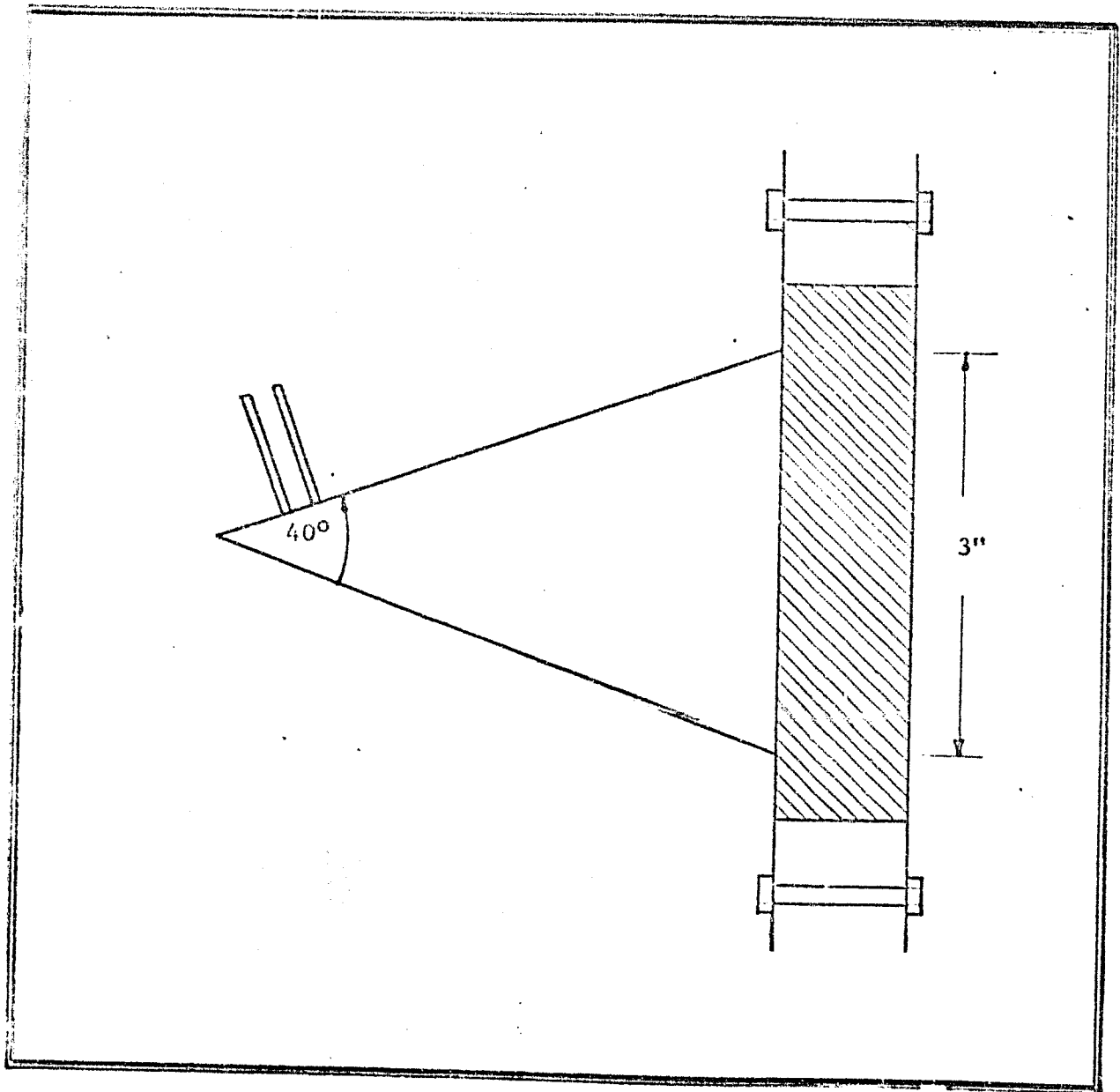
Se construyó un cono de cobre de 3" de diámetro máximo y un ángulo interno de 40°, a una distancia aproximadamente de 1 cm. del vértice del cono se soldó un tubo de 1/8" y a 1 cm. de distancia de éste, otro igual como se ilustra en la figura; en la boca del cono se soldó una placa de cobre con un orificio de 3".

Para soportar la materia filtrante, se hizo una placa análoga a la anterior con un orificio media pulgada mayor; en las dos placas se colocaron cintas de espuma de polietileno para evitar las fugas de aire en el sistema.

El sistema de prueba opera de la siguiente forma:

En el interior del cono se coloca una cantidad previamente pesada de polvo, por uno de los tubos del cono se introduce aire a través de un

rotámetro para determinar su gasto: en el otro tubo se conecta un manómetro en J con agua ventando a la atmósfera, logrando así determinar la diferencia de presión entre el interior del cono y el ambiente, siendo ésta precisamente la caída de presión causada por el filtro .

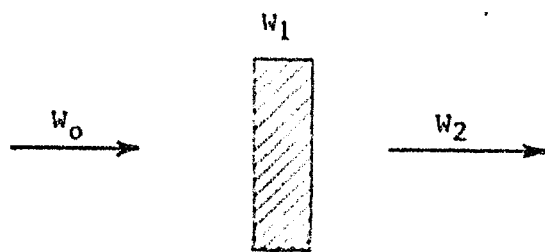


Una vez instalado el sistema se hace operar por un tiempo determinado ( 30 minutos es un tiempo prudente para la prueba ) a un gasto constante. Se determina el peso del filtro que ha sido tarado previamente y el peso del polvo residual en el cono; haciendo un balance de material se determina la cantidad que ha logrado atravesar el filtro, y dividiendo el peso del polvo detenido en el filtro entre el peso total que fue introducido al filtro se determina su eficiencia de operación a una velocidad dada.

Las pruebas se hicieron en los laboratorios y Plantas Piloto del Instituto Mexicano del Petróleo. Se operó con un rotámetro de una capacidad máxima de 60 pies cúbicos por hora, que es parte del sistema de enfriamiento de una pequeña columna de destilación para gasoleos; fue necesario intercalar al sistema un secador de alúmina y carbón activado y un filtro de celulosa para evitar arrastres de humedad y aceite respectivamente que pudieran provenir de la compresora central.

Se observó que las condiciones de diseño del cono no permitían versatilidad en la operación, ya que a 40 pies cúbicos por hora la resistencia al flujo del pequeño tubo de 1/8" fue tan grande que hizo necesario quitarlo y substituirlo por un tubo de 1/4"; la operación en estas condiciones fue magnífica, pero, el peso del cono de cobre excedía los 700g y su tamaño no permitía ser pesado en una balanza analítica; se empleó una balanza granataria eléctrica, pero los resultados de las pruebas fueron tan absurdos que fue necesario desechar esta posibilidad.

ya que era imposible determinar con precisión el peso del polvo residual en el cono, fue necesario buscar la forma de determinar la cantidad de polvo que había atravesado el filtro



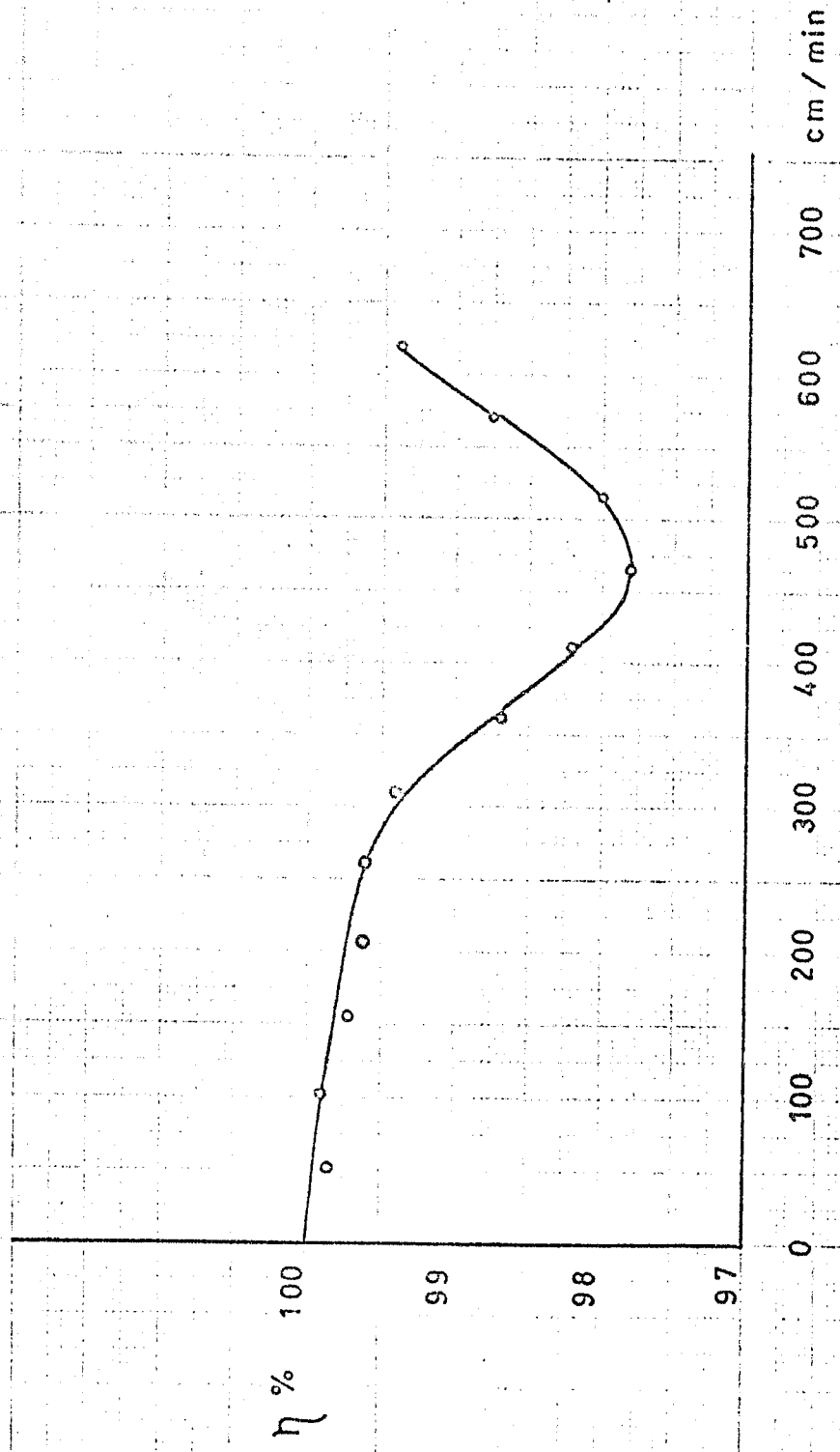
Por un balance de material se puede observar que  $W_0$ , la cantidad que llega al filtro, es igual a la suma del depósito en el filtro y la cantidad que logró pasar  $W_2$ .

$$W_0 = W_1 + W_2$$

$$n = \frac{W_1}{W_0} = \frac{W_1}{W_1 + W_2}$$

Colocando un papel filtro húmedo después del filtro es factible determinar las partículas sólidas que atraviesan la zona filtrante. Este papel está soportado con una malla de alambre; se pone a peso constante el papel filtro antes y después de la experiencia y por diferencia se determina la cantidad de polvo  $W_2$ . La gráfica que se muestra fue obtenida con este sistema y se puede observar que a una velocidad del aire de 465 cm/min se obtiene un mínimo de eficiencia lo cual concuerda con la teoría de filtración.





Siendo que la probabilidad de que una partícula sea retenida por un lecho fibroso es función del espesor y el número de partículas presentes tenemos:

$$\frac{dN}{dL} = -kN \quad (4.1)$$

$$\ln \frac{N_2}{N_1} = -kL \quad (4.2)$$

$$\log \frac{N_1}{N_2} = (k/2.3) L \quad (4.3)$$

Si hacemos que,  $N_2/N_1 = 0.1$  se tendrá el espesor del filtro requerido para detener el 90% de las partículas de la corriente.

$$\log \frac{N_1}{N_2} = \log 10 = 1 \quad (4.4)$$

Substituyendo en (4.3):

$$\frac{k}{2.3} (L_{90}) = 1 \quad \frac{k}{2.3} = \frac{1}{L_{90}} \quad (4.5)$$

Por lo que (4.3) quedará:

$$\log \frac{N_1}{N_2} = \frac{L}{L_{90}} \quad (4.6)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{C Q \theta}{P} \quad (4.7)$$

$$\log \frac{N_1}{N_2} = \log \frac{C Q \theta}{P} \quad (4.8)$$

En donde:

C : Concentración de partículas por unidad de volúmen

Q : Gasto volumétrico

$\theta$  : Tiempo

p : probabilidad de contaminación

Substituyendo ( 4.6 ) en ( 4.8 ) :

$$\log \frac{C Q \theta}{P} = \frac{L}{L_{90}} \quad (4.9)$$

$$L_{90} = \frac{0.79 (1 - \alpha) D_f}{\alpha (1 + 4.5 \alpha) n_o} \quad (4.10)$$

Esta ecuación fue desarrollada por Chen, en donde:

$$n_o = \frac{1}{2 (2 - \ln Re)} \left[ 2 (1+R) \ln (1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R} \right]$$

$$Re = \frac{D_f V \rho}{\mu} \quad (4.11)$$

$$R = D_p / D_f$$

$$\alpha = \frac{\text{vol. fibra}}{\text{vol. filtro}}$$

Existe una velocidad crítica para la cual la eficiencia es mínima; es en este valor donde debe hacerse el diseño del filtro.

$$V_c = \frac{1.125 \mu D_f}{C \rho_p D_p} \quad (4.12)$$

C : Factor de Cunningham-Stokes

$$C = 1 + K_{me} \frac{\lambda_m}{D_p} \quad (4.13)$$

$$K_{me} = 1.644 + 0.552 e^{-0.656 \frac{D_p}{\lambda_m}} \quad (4.14)$$

Para el caso particular que estamos tratando el cálculo de C quedará de la siguiente manera:

$$D_p = 2 \mu = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\lambda_m = 9.82 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

$$K_{me} = 1.644 + 0.552 e^{-0.656 \frac{D_p}{\lambda_m}}$$

$$\frac{D_p}{\lambda_m} = 20.4$$

$$e^{13.38} = 6.32 \times 10^5$$

La potencia a la cual está elevada e para partículas del orden de una micra da un número tan grande que al pasar al denominador puede ser despreciado sin introducir ningún error. Por lo que  $K_{me}$  queda como:

$$K_{me} = 1.644$$

$$C = 1 + 1.644 \frac{\lambda^m}{D_p} = 1.081$$

La determinación de alfa se realiza por inmersión de un filtro de volúmen previamente determinado en una probeta con agua, determinandose así el volúmen real de la fibra.

$$\text{Vol. de fibra} = 8 \text{ cm}^3$$

$$\text{Vol. de filtro} = 263 \text{ cm}^3$$

$$\alpha = 3.045 \times 10^{-2}$$

$D_f$  es el diámetro estadístico de la fibra; se hacen una serie de determinaciones de diámetro de fibra y se calcula el porcentaje de cada tamaño existente en el filtro.

$$D_f = \frac{\sum \% D^2}{\sum \% D}$$

Se hicieron las siguientes determinaciones de diámetro de fibra, habiéndose encontrado aproximadamente cantidades iguales de cada diámetro. Los valores de  $D$  están expresados en micras.

Se observó que el porcentaje de fibra para cada tamaño es aproximadamente igual por lo que su producto por el valor del diámetro y su cuadrado se anularán en el cociente.

	D	D <sup>2</sup>
	9.2	82.3
	11.6	135.0
	1.0	1.0
	3.6	13.0
	3.0	9.0
	10.8	117.0
	12.6	158.0
	3.8	14.4
	1.8	3.23
	13.2	174.0
SUMAS	<hr/> 70.6	<hr/> 706.93

$$D_f = \frac{\sum D^2}{\sum D}$$

$$D_f = 10 \mu$$

SISTEMA DE CALCULO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE FILTRACION

El diseño de un filtro fibroso debe hacerse en el punto en el cual la eficiencia de filtración es mínima; de esta manera se asegura la operación eficiente del sistema a cualquier velocidad. Para una eficiencia mínima hay una velocidad crítica, a la cual se realiza el diseño.

$$v_c = \frac{1.125 \mu D_f}{C \rho_p D_p^2}$$

Una vez determinada la velocidad crítica se procede el cálculo del es pesor de filtro con el siguiente sistema simplificado:

$$I.- \quad Re = \frac{D_f v \rho}{\mu}$$

Para este caso particular.

$$D_f = 10 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\rho = 8.5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 0.018 \times 10^{-2} \text{ g/cm seg.}$$

$$v = \text{cm/min}$$

$$Re = 8.55 \times 10^{-5} v$$

$$II.- \quad n_o = \frac{1}{2 (2 - \ln Re)} \left[ 2 (1+R) \ln (1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R} \right]$$

$$R = D_p / D_f$$

$$n_0 = \frac{7.2 \times 10^{-2}}{2 (2 - \ln Re)}$$

$$\text{III. - } L_{90} = \frac{0.79 (1 - \alpha) D_f}{\alpha (1 + 4.5 \alpha) n_0}$$

$$\alpha = 3.45 \times 10^{-2}$$

$$L_{90} = \frac{2.22 \times 10^{-3}}{n_0}$$

$$\text{IV. - } \log \frac{N_1}{N_2} = \frac{L}{L_{90}}$$

$$\frac{L}{L_{90}} = A \quad \log N_1 / N_2 = A$$

$$\log N_1 - \log N_2 = A$$

Ahora bien si hacemos que  $N_1$  sea 100, tendremos:

$$\log N_2 = \log N_1 - A$$

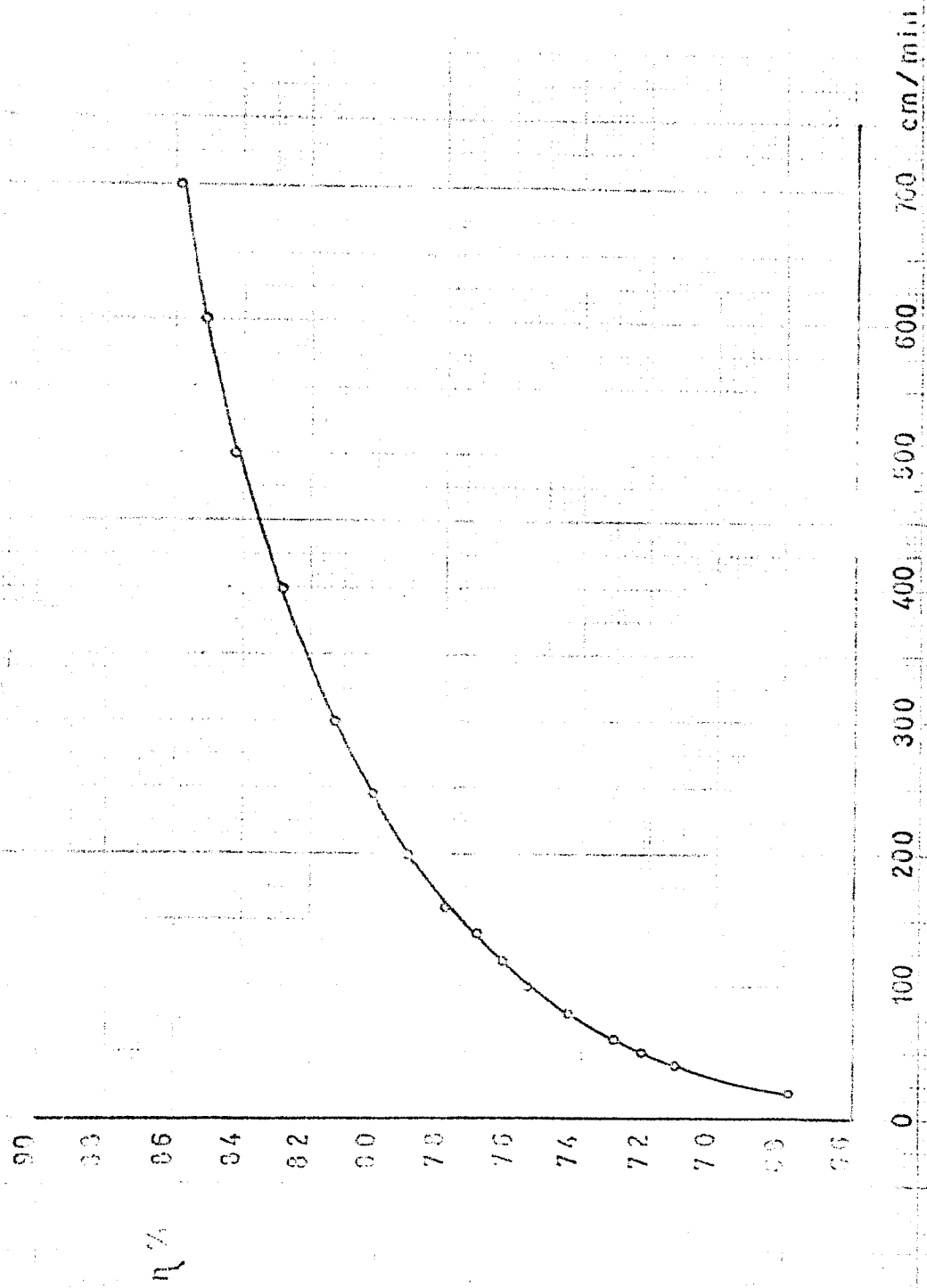
$$\log N_2 = 2 - A$$

$$n = 100 - N_2$$

Habiendose utilizado el sistema de cálculo anteriormente descrito se obtuvieron los siguientes datos:



V cm/min	Re x 10 <sup>-3</sup>	n <sub>o</sub> x 10 <sup>-3</sup>	L <sub>90</sub>	n%
20	1.710	4.300	5.15	67.98
40	3.425	4.72	4.70	71.20
50	4.27	4.85	4.57	72.20
60	5.13	4.96	4.46	73.05
80	6.84	5.17	4.30	74.40
100	8.55	5.33	4.16	75.60
120	10.27	5.48	4.06	76.27
140	11.97	5.59	3.97	77.09
160	13.70	5.73	3.87	78.02
200	17.12	5.95	3.73	79.15
242	20.70	6.13	3.62	80.18
300	25.72	6.37	3.48	81.38
400	34.25	6.70	3.32	82.78
500	42.80	7.00	3.17	84.26
600	51.30	7.25	3.06	85.14
700	60.00	7.46	2.98	85.87



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

El estudio que se ha hecho sobre la fibra de vidrio que se fabrica en México, para su empleo como medio filtrante en la descontaminación de partículas en el aire ha traído como consecuencia las siguientes consideraciones:

La fibra de vidrio que se fabrica en México es totalmente heterogénea en lo que respecta a diámetros de fibra. Propiamente el uso de la fibra de vidrio como materia filtrante no ha sido estudiado; su empleo se ha enfocado hacia los aislamientos, tanto térmicos como acústicos, razón por la que las características importantes a la filtración tales como el diámetro de fibra y la porosidad no han sido consideradas.

La comparación de los estudios teóricos y prácticos sobre la eficiencia en la fibra de vidrio han dado resultados altamente positivos; ya que las eficiencias teóricas son ampliamente superadas. Los valores esperados para la velocidad crítica se han encontrado desplazados a una velocidad mayor.

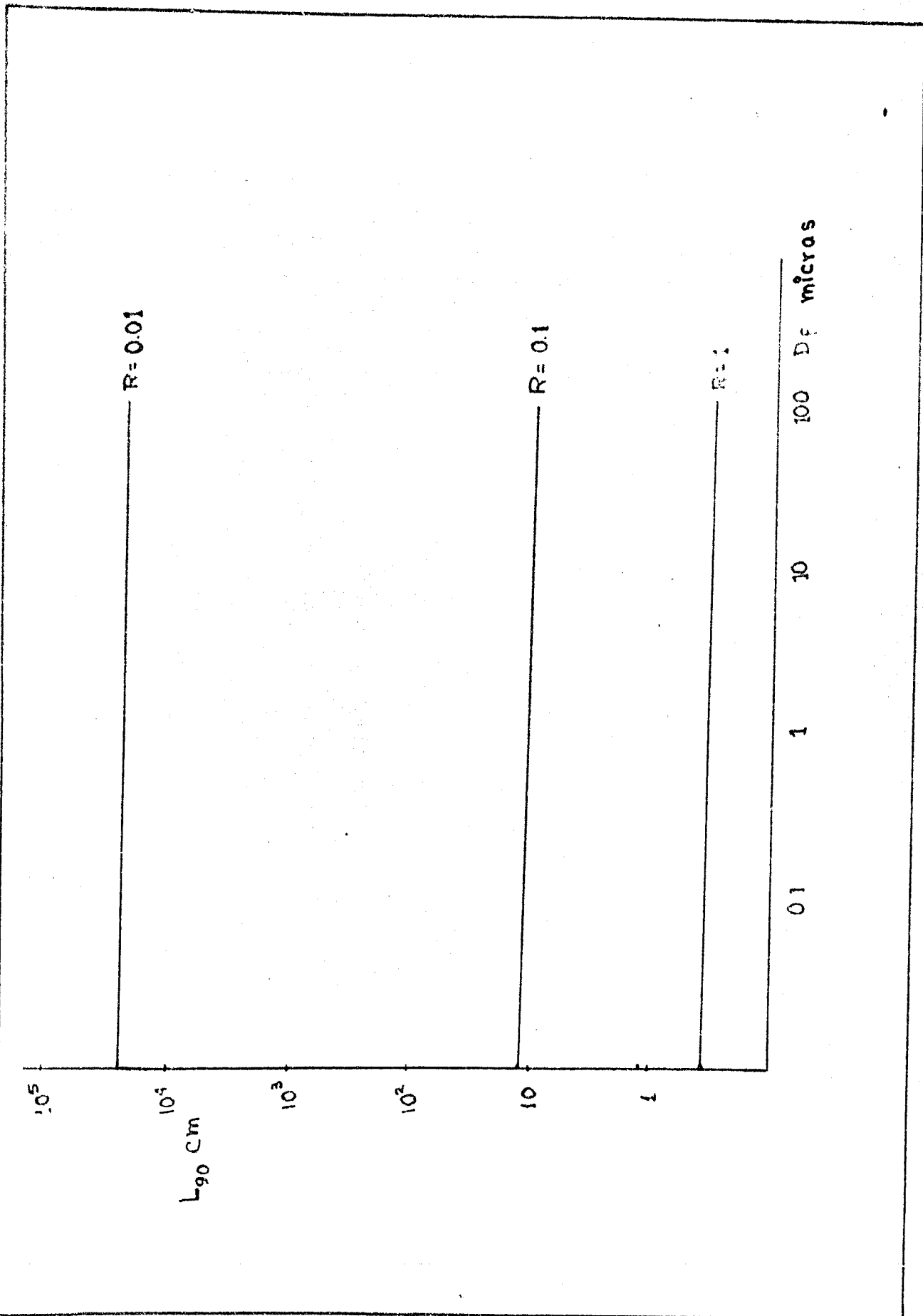
Para el empleo industrial de la fibra de vidrio como lecho filtrante considero conveniente un estricto control en la fabricación de la fibra, para lograr mayor homogeneidad. Por otra parte, utilizando el sistema de cálculo anteriormente descrito es posible realizar el diseño de un sistema de filtración sin temer a tener un espesor de filtro insuficiente.

Siendo que el cálculo dará un espesor sobrado para el servicio; considere conveniente en un futuro estudiar una ecuación empírica para determinar más precisamente el comportamiento de la fibra de vidrio como material filtrante.

Los valores de la velocidad crítica obtenidos teóricamente son 1.92 veces menores a el valor real obtenido para la fibra de vidrio de 4 micras nominales producida por Vitro Fibras, S.A.; la eficiencia calculada a la velocidad crítica real es 16% menor que la obtenida experimentalmente.

Para el diseño de un filtro utilizando la fibra de vidrio antes citada es conveniente multiplicar la velocidad crítica teórica por 1.92 y obtener la eficiencia teórica para este valor. El espesor del filtro obtenido tendrá un margen de seguridad muy conveniente para la operación.

En la gráfica que sigue se ha calculado  $L_{90}$  en función del diámetro de la fibra, las condiciones de operación y las propiedades del filtro han sido tomadas como constante con los mismos valores empleados en el trabajo experimental; se ha tomado  $R$  como parámetro. Es muy importante observar que mientras la relación entre el diámetro de partícula y el diámetro de fibra sea constante, el espesor del lecho filtrante no varía. Esta propiedad puede ser de gran importancia para el diseño.



## E P I L O G O

La contaminación atmosférica es un problema que aumenta día a día en nuestro país. Ha sido mi intención al elaborar este trabajo el dar difusión a un tema poco conocido y que considero de gran importancia en el desarrollo social y económico de México.

Quiero agradecer al Sr. Ing. Quím. Constantino Alvarez M. su valiosa dirección que ha hecho posible la realización de este trabajo y al Sr. Quím. Julio Terán Z. que más que un maestro ha sido para mí un amigo.

Quiero también agradecer a los Sres. Ings. Eno Mascanzoni y Jorge de Landa S.; funcionarios del Instituto Mexicano del Petróleo su anuencia para utilizar las instalaciones y laboratorios del I.M.P. para la realización de la sección experimental.

A Fiberglass, S.A. y Yesos Universales, S.A. les quedo en deuda por haberme proporcionado gentilmente los materiales para mi trabajo.

A Eduardo Lara H. compañero que estimo y al cual agradezco en todo lo que vale su ayuda.

A mis amigos y compañeros.

## B I B L I O G R A F I A                      G E N E R A L

- 1.- Magil P., Holden F. Air Pollution Handbook ( 1956 )
- 2.- White P.A.F. Smith S.E. High Efficiency Air Filtration (1964),  
Butterworths
- 3.- Perry J.H. Chemical Engineers Handbook ( 1962 ), McGraw-Hill Book
- 4.- Sria. de Salubridad y Asistencia, Dirección Gral. de Higiene Ind.  
" Normas de Higiene aplicables a la industria polvosa
- 5.- Compendio de los trabajos presentados en el Primer Simposium Inter  
nacional sobre el " Control de la Contaminación del Aire" A.S.M.E.  
S.M.N.C.T.A.C. México (1966).