

0856

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SECCIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“COMPARACION EXPERIMENTAL DE FILTRACION
DIRECTA SEGUN LA PRACTICA AMERICANA
Y EUROPEA”

TRABAJO DE GRADO (SIN CRÉDITOS)
PRESENTADO POR:

ING. GIOVANNI ESPINAL F.

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRO EN INGE-
NIERIA AMBIENTAL.

MÉXICO, D.F.

1985.

(firma)



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.

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SECRETARÍA DE CULTURA Y FOLCLORE

.....
.....
.....
.....
.....

.....
.....
.....
.....
.....



DEPFI

T. UNAM
1985
ESP

APROBADO POR EL JURADO

PRESIDENTE: M. EN C. FRANCISCO MONTEJANO URANGA _____

VOCAL: M. EN I. GASTON MENDOZA GAMEZ _____

SECRETARIO: M. EN C. EDMUNDO IZURIETA RUIZ _____

SUPLENTE: M. EN I. SALVADOR AYANEGUI JARITZ _____

SUPLENTE: M. EN C. MARIO SOLANO GONZALEZ _____

INDICE.

partes:

- [1] INTRODUCCIÓN
- [2] REVISIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN.
- [3] VARIABLES EXPERIMENTALES.
- [4] MODELOS DE LABORATORIO.
- [5] PROGRAMA EXPERIMENTAL.
- [6] EVALUACIÓN DE LOS DATOS
- [7] CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.
- [8] ANEXOS.
- [9] BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

RESUMEN.

En el presente trabajo se buscó como principal objetivo obtener la mayor información experimental posible sobre los modelos de filtración directa construidos en el laboratorio de la DEPFI.^[2] Dichas instalaciones, filtros pilotos, representan una fuente potencial de experimentación, así como de aplicación docente; y de comparación entre las formas de diseño y operación de los filtros conocidas como: Práctica Americana y Práctica Europea.

Los datos experimentales obtenidos durante el presente trabajo fueron analizados y transformados para utilizar el Modelo matemático propuesto por Arun Deb,^[3,5] solución numérica a las ecuaciones de filtración, con el fin de establecer expresiones que puedan, en lo posible, simular el comportamiento de los modelos analógicos ante condiciones diferentes a las probadas experimentalmente.

INTRODUCCIÓN

En el año de 1964 Tomás R. Camp^[4] en su artículo sobre la TEORÍA DE LA FILTRACIÓN, y que fuera publicado en la Journal of sanitary engineering division, concluyó al final de dicha publicación sobre la importancia de los estudios sobre planta piloto antes del diseño final; los mismos deberían ser utilizados como medios de selección de: coagulantes químicos, ayudas de coagulación y filtración, medios filtrantes; y en la determinación de las tasas de filtración y de lavado así como también en el tamaño, número y dimensiones de los filtros.

Camp también indicaba que aun con la ayuda que brindaban pruebas de laboratorio, tales como, la prueba de Jarras, ésta, sin embargo, no puede dar información sobre el posible comportamiento del floc ante las partículas del medio filtrante, ni sobre la remoción del mismo, tampoco sobre el largo de las carreras que podrían esperarse. Información, ésta, que es valiosa para una correcta, o final decisión, evaluación del coagulante, ayuda de coagulación y de filtración; datos que participaran y regirán el diseño de un filtro. Todo lo anterior puede ser obtenido gracias a la utilización de un filtro a escala de laboratorio.

Dada la cantidad de variables que pueden influir en el diseño de una unidad de filtración, especialmente con medios múltiples, resulta una buena práctica utilizar columnas de filtración para someterlas a condiciones similares a las que po-

drían presentarse ante las unidades reales.

Los modelos experimentales permiten, además, observar el comportamiento probable del floc para diferentes combinaciones, ya sea por ejemplo, de medios filtrantes; ofreciéndose la oportunidad de ensayar y seleccionar el medio, o medios, que mejor se adapte a las necesidades futuras; así como cualquier sustancia química agregada para hacer más eficiente el proceso.

Evidentemente un diseño sobre una base experimental y racional será de mayor efectividad, calidad y económico que aquel que se base sobre valores tomados de experiencias pagadas y que aparecen en textos o en literaturas sobre filtración.

En el presente trabajo se aprovecharon las ventajas que aportan los modelos de filtración para realizar una comparación experimental sobre las técnicas de filtración directa más comúnmente empleadas y que detallaremos en el interior del presente escrito.

Como antecedentes al presente trabajo es importante señalar que el trabajo actual busca como objetivo principal obtener la mayor información experimental posible de los modelos construidos en el año de 1984 durante la ejecución de la tesis del ING. ALVARO CORONADO J. Y que fuera dirigida por el M. en I. ING. GASTON MENDOZA G. [7]

REVISIÓN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN

El avance que se ha logrado en el conocimiento y tecnología de la filtración es el resultado de la constante insistencia en procurar un ajuste, más realista, entre los conocimientos teóricos y los resultados experimentales; todo bajo el fin común de en el futuro poder diseñar adecuadamente, y preveer las condiciones de operación de futuras unidades de filtración, bajo un estado más eficiente y económico.

La filtración se emplea en el tratamiento del agua, con o sin pretratamiento de coagulación y sedimentación, para eliminar los sólidos presentes en las aguas superficiales, precipitados del ablandamiento, etc.

La revisión teórica presente centra su atención sobre la técnica generalmente denominada FILTRACIÓN DIRECTA; la cual surgió con las tendencias actuales de aprovechar mejor tanto las propiedades del medio filtrante, retención, intercepción, adhesión, etc, como las de los compuestos químicos adicionados. - Logrando con ello eliminar, las frecuentemente usadas, unidades de floculación y sedimentación.

La filtración directa ha dado buenos resultados ^[2, 7, 11] sobre todo en el tratamiento de aguas con bajos contenidos de turbiedad*, aunque se ha sugerido su empleo en aguas con turbiedades mayores.

* inferior a 60 UNT por establecer un límite.

La tendencia actual a utilizar velocidades de filtración mayores (tagas) ha conducido al desarrollo de varios métodos, o técnicas, para obtener jornadas de filtración (carreras o tiempos de funcionamiento) aceptables.

El método más corriente en los ESTADOS UNIDOS y países de América consiste en utilizar un lecho de doble capa filtrante, compuesto de una capa de antracita gruesa sobre una capa de arena fina. Dado que la antracita tiene un peso específico más bajo entonces, bajo condiciones de selección adecuado de los tamaños y velocidad de lavado, ésta permanecerá en la parte superior durante el paso ascendente del agua de limpieza de los lechos; y que provoca la fluidización de los mismos.

Por otro lado, el método más utilizado en los países EUROPEOS es el de utilizar un lecho filtrante único formado por arena gruesa, con tamaños comprendidos entre un rango de 0.50 a 2.00 mm de diámetro de las partículas, y un lecho con una profundidad superior (1.20 a 1.80 m. de espesor).

También existe una diferencia sustancial en cuanto a los métodos de limpieza o lavado del lecho, con respecto a la técnica americana antes citada.

Dicha discrepancia es que la práctica europea utiliza, además del agua, la inyección de aire en forma ascendente; el cual provoca fricción entre los granos del lecho con la idea de lograr el desprendimiento del material depositado durante la etapa de filtración.

Así mismo, esta técnica no busca la expansión del lecho

debido principalmente a la alta velocidad que se requeriría para levantar las partículas del medio. Una de las ventajas que se ha señalado sobre la utilización de aire en el proceso de lavado, además de la indicada, es la de ahorrar agua de lavado, mejorando la producción neta del filtro.

Para abreviar la terminología sobre ambas técnicas de filtración denominaremos a partir de este momento a las prácticas anteriormente citadas como: Americana y Europea. Y los modelos, filtros pilotos, que han sido comparados experimentalmente fueron construidos enmarcados en las características anteriormente mencionadas durante la tesis que tuvo como objetivo el diseño e instalación de dichos modelos.^[7]

La filtración en lechos porosos es una de las más viejas y ampliamente utilizadas operaciones de tratamiento; sus principios y mecanismos han tratado de ser explicados por una gran cantidad de investigadores y su experimentación ha sido realizada bajo una variedad de condiciones; de estas investigaciones han surgido expresiones matemáticas que buscan simular el proceso de filtración.

La tabla N° 1^[13] nos da una idea de lo anteriormente indicado; así como las dificultades sobre llevadas por estos investigadores al tratar de lograr datos experimentales de un proceso que aun encierra secretos y campos por explorar.

TABLA No 1 [13]
CONDICIONES EXPERIMENTALES USADAS POR VARIOS
INVESTIGADORES.

	[8]					
NOMBRE ASPECTO:	IVES [JUNIO 1965]	IVES [AGOST. 1965]	FOX Y CLEACHY [OCT-1966]	LING [JULIO 1965]	ELVAGEN (*)	DEB. [1969]
Suspensión utilizada:	algas	esferas de polivinil	Floc de hidróxido férico	Floc de hidróxido férico	Floc de hidróxido férico	tierra de Fuller
Tamaño de la arena en mm. (*)	0.25 A 0.75	0.647	0.705	0.322 0.383 0.458 0.544	0.47 A 0.84	0.647 A 0.772
porosidad del lecho.	0.37 A 0.39	0.365	0.405	0.442	0.408	0.43
Tasa de filtración Gal./min. p ²	2,4,6	4	3,4,6	1,2,3 4,5,5	2	2 2.5 3
Temperatura en °C.	22.5 A 26	—	15.5	23-24	4	—
Comentarios adicionales	(*)	(**)	(***)	(**)	****	****

COMENTARIOS ADICIONALES:

[*] Concentración, C, y depósito específico, σ , medidos por radioactividad.

[**] C medida como turbiedad.

[***] C medida como contenido de hierro.

[****] C medido por contenido de hierro. Camp dió las relaciones para transformaciones a concentración por volumen.

[*****] C medida con un colorímetro fotoeléctrico.

MODELOS MATEMÁTICOS SOBRE FILTRACIÓN (PARTE 2)

Para poder predecir el comportamiento de los modelos de filtración bajo condiciones, más allá de las limitaciones de carga y tiempo existentes, o diferentes a las ensayadas, se hizo necesario realizar una breve revisión de los modelos propuestos por varios autores ^[4, 8, 12, 9, 10]; y elegir entre ellos uno que tuviera, en lo posible la flexibilidad de adaptarse a la información experimental del presente trabajo.

Las expresiones matemáticas que mejor se adaptaron; fueron las definidas por Arun Deb ^[8, 9] con la particularidad que algunos de los parámetros de su modelo, especialmente los referentes a la suspensión, fueron usados para ajustar el modelo, dada la dificultad, personal, de poderlos determinar.

Se han propuesto una gran cantidad de expresiones con el fin de representar matemáticamente el comportamiento de un medio filtrante ante el paso de una suspensión, sin embargo la preferencia en su utilización se ve influenciada por su fiabilidad ante datos experimentales.

De los pocos modelos que fueron verificados con datos experimentales podemos citar el de IVEs, basado sobre las experiencias de IWASAKI ⁽¹²⁾ sobre filtros lentos, y cuyo enfoque teórico de la filtración apareciera publicado en el año de 1937.

Un segundo modelo es el que fue propuesto por CAMP ^[4] cimentado sobre la famosa expresión de KOZENY sobre el gradiente hidráulico a través de un lecho limpio de arena.

El tercer modelo consultado es el desarrollado por A. DEB; basado sobre los modelos anteriores al realizar trans-

formaciones adimensionales.

Estos modelos serán descritos brevemente en el presente apartado ya que ellos forman un enlace teórico importante con los datos experimentales presentados y evaluados anteriormente.

MODELO DE IWASAKI [12,13]

El planteamiento del modelo de IWASAKI descansó experimentalmente de sus ensayos sobre la observación microscópica, penetración y formas de distribución de microorganismos, y de partículas de materia fina en un lecho mezclado de arena y de tamaño no uniforme de los granos. Las velocidades de filtración fueron de 3 a 12 metros por día.

Algo importante en el estudio de IWASAKI fue analizar los diferentes grados de penetración de material en suspensión, en concordancia con diferentes combinaciones de tamaño de partículas del medio, y de velocidad de filtración.

Bajo la consideración de que la probabilidad de impedimento (obstrucción) puede incrementarse al rellenarse los poros con pequeñas partículas contenidas en el líquido; y todo lo anterior acorde con las expresiones N°1 y N°2:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \lambda I \dots \dots \dots \text{Ecuac. N°1}$$

La ecuación N°1 establece la relación entre la profundidad, z , del lecho de arena y la concentración en el agua

filtrada I.

En la expresión N° 1:

I = cantidad de materia microscópica por unidad de área que ha alcanzado la profundidad, z , en el lecho de arena en una unidad de tiempo. [número individual/cm².día]

z = Profundidad dentro del lecho de arena, L.

λ = módulo de impedimento, L⁻¹

$$\frac{\partial I}{\partial z} + \frac{\partial S}{\partial \gamma} = 0 \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. N°2}$$

donde:

S = cantidad de materia microscópica, contenida en 1 cm³ de arena de lecho y a una cierta profundidad, z , en un cierto tiempo.

γ = tiempo de filtración.

En la ecuación N° 1 el módulo de impedimento, λ , obedece a la ley:

$$\lambda = \lambda_0 + cS \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. N°3}$$

donde:

λ_0 = módulo de impedimento inicial = constante.

c = coeficiente que afecta el módulo de impedimento.

MODELO DE IVES^[13]

Como ya antes se indicó IVES modificó el modelo de IWASAKI gracias a su experimentación sobre filtros rápidos de arena.

IVES reformó las expresiones de IWASAKI, especialmente las N^o2 y N^o3, y señaló así la dependencia de las variables en términos de la concentración volumétrica; transformando la ecuación N^o2 incluyendo la tasa de filtración como una variable independiente.

Las expresiones generadas por IVES son:

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^{\circ}4$$

En donde:

C = concentración de las partículas a la profundidad L, expresada como volumen por unidad de volumen de agua, L³/L³.

L = profundidad de la capa filtrante, L.

λ = módulo de impedimento, L⁻¹.

Una segunda ecuación propuesta por IVES; y en la que aparece un cambio radical a la expresión N^o2 de IWASAKI:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \frac{(1 - f_0)}{v} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^{\circ}5$$

Donde:

f_0 = valor de la porosidad en el momento de depósito de los sólidos.

\bar{V} = velocidad de aproximación, $L.T^{-1}$

σ = depósito específico, (volumen depositado por unidad de volumen del filtro, $L^3.L^{-3}$)

t = tiempo de filtración, T .

Una tercera expresión producto de la labor de IVES para modelar los cambios en las pérdidas de carga del proceso de filtración es:

$$\frac{\partial h}{\partial L} = \left(\frac{\partial h}{\partial L} \right)_0 + K\sigma \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 6$$

Donde:

h = pérdidas de carga, L .

$\left(\frac{\partial h}{\partial L} \right)_0$ = pérdidas de carga iniciales, cuando el filtro aun esta limpio, por unidad de profundidad.

K = constante.

IVES estableció además una expresión importante para el módulo de impedimento λ :

$$\lambda = \lambda_0 + c\sigma - \frac{\phi\sigma^2}{f - \sigma} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 7$$

La ecuación anterior, indica la reducción de λ al final del proceso de filtración.

MODELO DE CAMP [4]

Son dos las expresiones más importantes elaboradas por T.R. CAMP, ambas cimentadas sobre el concepto de gradiente hidráulico y su variabilidad durante el paso de un líquido por un filtro.

CAMP basó sobre la ecuación de KOZENY su modelo matemático, además de los resultados experimentales de STEIN, sobre la naturaleza del proceso de taponamiento en un medio filtrante.

La primera expresión propuesta por CAMP; y que puede ser aplicada a la situación donde la remoción del lecho filtrante es debida a la formación de una capa de material depositado sobre los granos es:

$$i = \frac{K(1 - P_0 + \sigma)^2}{(P_0 - \sigma)^3 (d + \Delta d)^2} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 8.$$

Donde:

$$K = \frac{J S^2 \nu}{g} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 9$$

i = gradiente hidráulico o pérdidas de carga por unidad de profundidad $[dh/dL]$ $L.L^{-1}$

ν = viscosidad cinemática $L^2.T^{-1}$

g = aceleración de la gravedad.

v = velocidad

S = factor de forma.

J = constante adimensional; y si el tamaño del grano es determinado por el método de conteo y pesado de HAZEN, el valor de J es aproximadamente = 6 para filtración en la región de flujo laminar.

Δd = incremento en el tamaño del grano, d .

P_0 = porosidad inicial del lecho.

CAMP consideró el radio hidráulico R_h como:

$$R_h = \frac{P_0 d_0}{(1 - P_0) S} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 10.$$

Donde: d_0 = tamaño del grano al inicio de la filtración.

Por lo que la ecuación N^o 9 se puede expresar como:

$$i = \frac{\bar{K} (1 - P_0)^2}{d_0^2 P_0^2 (P_0 - \sigma)} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 11$$

\bar{K} es constante para una temp. y tasa de filtración constante.

En su escrito [4] CAMP indicaba también un modelo entre la variabilidad del gradiente desde un valor inicial, i_0 , a un gradiente al tiempo t ; esta relación fue de utilidad para determinar el depósito específico al procesar los datos experimentales:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{P_0}{P_0 - \sigma} \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 12$$

MODELO DE DEB.

La medida de la concentración es uno de los principales problemas de aplicación de los modelos anteriores, ya que en los mismos se habla de C como una concentración de volumen sobre volumen, situación que prácticamente obliga a conocer el peso volumétrico de la materia en suspensión. - El modelo de DEB presenta concentraciones adimensionales, razón por la cual se hace más práctica su utilización.

La variación de la concentración de la suspensión influente y del depósito específico a cualquier profundidad de un lecho filtrante y tiempo de filtración puede ser matemáticamente representado por dos ecuaciones parciales diferenciales:

$$\frac{\partial C}{\partial L} = - \lambda C \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 13$$

$$\frac{\partial C}{\partial L} + \frac{1}{v} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots \text{ECUAC. N}^\circ 14$$

Dada la complejidad de estas expresiones ARUN DEB^[13,9] propuso una solución a dichas ecuaciones al aplicar diferencias finitas sobre las mismas.

Al realizar las transformaciones matemáticas sugeridas por DEB es posible contemplar variaciones en la concentración influente; situación que se aprovechó en el presente trabajo, dado que la suspensión artificial creada tenía inevitablemente una caída en su magnitud durante los ensayos de filtración.

Un programa de computadora es usado (ver anexo N^o 1) para resolver las ecuaciones anteriormente enumeradas, sufriendo los cambios de diferencias finitas y sustituciones por variables adimensionales realizadas por A. DEB.

Las ecuaciones N°13 y N°14 son transformadas por DEB; empleando también la ecuación N°7; logrando con ello las expresiones siguientes:

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{v}{(P-\sigma)} \frac{\partial C}{\partial L} + \frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda' C \dots \dots \text{ECUAC. N°15}$$

$$v \frac{\partial C}{\partial L} + (1-P_s) \frac{\partial \sigma}{\partial t} + (P-\sigma) \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \dots \dots \text{ECUAC. N°16}$$

Donde:

λ' = Denominado por DEB "coeficiente modificado del filtro"
 v = velocidad de aproximación de filtración.

P_s = porosidad del material depositado en el lecho filtrante

Las ecuaciones N°15 y N°16 son expresadas adimensionalmente como:

$$\frac{1}{(P-\sigma)} \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{L}} + \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{t}} = -\underline{\lambda} \underline{C} \dots \dots \text{ECUAC. N°17}$$

$$F \frac{\partial \sigma}{\partial \underline{t}} + \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{L}} + (P-\sigma) \frac{\partial \underline{C}}{\partial \underline{t}} = 0 \dots \dots \text{ECUAC. N°18}$$

En las cuales:

\underline{C} = relación entre la concentración a cualquier profundidad, C , y la concentración influente C_0 . ($\underline{C} = C/C_0$)

\underline{L} = profundidad adimensional = L/L : L = profundidad total del lecho.

\underline{t} = tiempo adimensional = $t(v)/L$.

$\lambda =$ coeficiente adimensional del filtro $= \frac{\lambda' L}{\sqrt{\quad}}$

$F =$ constante adimensional de depósito $= \frac{(1 - P_s)}{C_0}$

Combinando las ecuaciones N°17 y N°18 se produce la ecuación N°19:

$$\frac{F}{P - \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda C \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. N°19}$$

Por análisis dimensional sobre el coeficiente λ ; DEB formula la dependencia entre éste y el depósito:

$$\lambda = B \left(\frac{X}{P - \sigma} \right)^A \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. N°20}$$

A y B; son determinados experimentalmente para cada carrera.

$$X = 1 + \left(2 - \frac{n}{2} \right) \frac{\Delta d}{d} + \left(1 - \frac{n}{2} \right) \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. 21}$$

Donde:

$n =$ número de contactos de cada grano con otro.

n : para granos esféricos, de un único tamaño.

$$n = \frac{15.774 - 26.5109 P_0}{1 - P_0} \quad \dots \dots \dots \text{ECUAC. 22}$$

$\frac{\Delta d}{d} =$ incremento en el tamaño del grano sobre el tamaño original del grano; definido como una función de

n, ϕ, P y σ .

$\phi =$ factor de forma del grano limpio.

En la ecuación N°22 (N°28 de la referencia [8]) expresa la relación teórica que existe entre la porosidad inicial, B , de un medio filtrante (o porosidad de empaque) con el número de puntos de contacto promedio entre cada grano, n .

Para establecer la ecuación N°22 es necesario basarse sobre las hipótesis siguientes:

[i] El medio poroso consiste de partículas de forma esférica las cuales crean una estructura de huecos romboédricos.

[ii] Los ángulos de fase de los romboedros tienen un valor de 60° ó 90° .

La expresión anterior (N°22) sobre el tipo de arreglo y la porosidad del lecho, así como la forma de cada una de las partículas; conceptualiza la dependencia entre las formas geométricas creadas por el arreglo de los granos en el medio filtrante y el vacío formado por este ordenamiento, con el número probable de contactos entre cada partícula.

El término Δd de la ecuación N°21 es obtenido al emplear la ecuación N°23 (ver hoja siguiente), esta relación de incremento adimensional del tamaño del grano es también una función de n :

$$\frac{\Delta d}{d} = \left(\frac{12}{n\psi - 24} \right) - \left[\frac{144}{(n\psi - 24)^2} - \frac{24\sigma}{(n\psi - 24)^3(1-P)} \right]^{1/2} \dots \text{ECUAC. 23}$$

Para DEB las pérdidas de carga pueden ser expresadas haciendo una extensión de la ecuación de KOZENY como:

$$\frac{\partial H}{\partial L} = \frac{\partial H}{\partial L} \left[1 + G(1 - 10^{-K\sigma}) \right] \left[\frac{P}{(P-\sigma)} \right]^3 \dots \text{ECUAC. 25}$$

Donde:

$$\frac{\partial H}{\partial L} = J \frac{v^2}{g} \frac{(1-P)^2}{P^3} \frac{v}{d^2} L \dots \text{ECUAC. 26}$$

G y K ; parámetros de pérdida de carga obtenidos experimentalmente.

Finalmente DEB resolvió por diferencias finitas las ecuaciones N°19 y N°25; haciendo el planteamiento de una red teórica, tal como la presentada en la FIG. N°1; la que se deberá resolver de celda en celda partiendo de las condiciones de frontera:

Las soluciones propuestas por DEB son: (acorde con el sistema de coordenadas establecido en la fig. N°1).

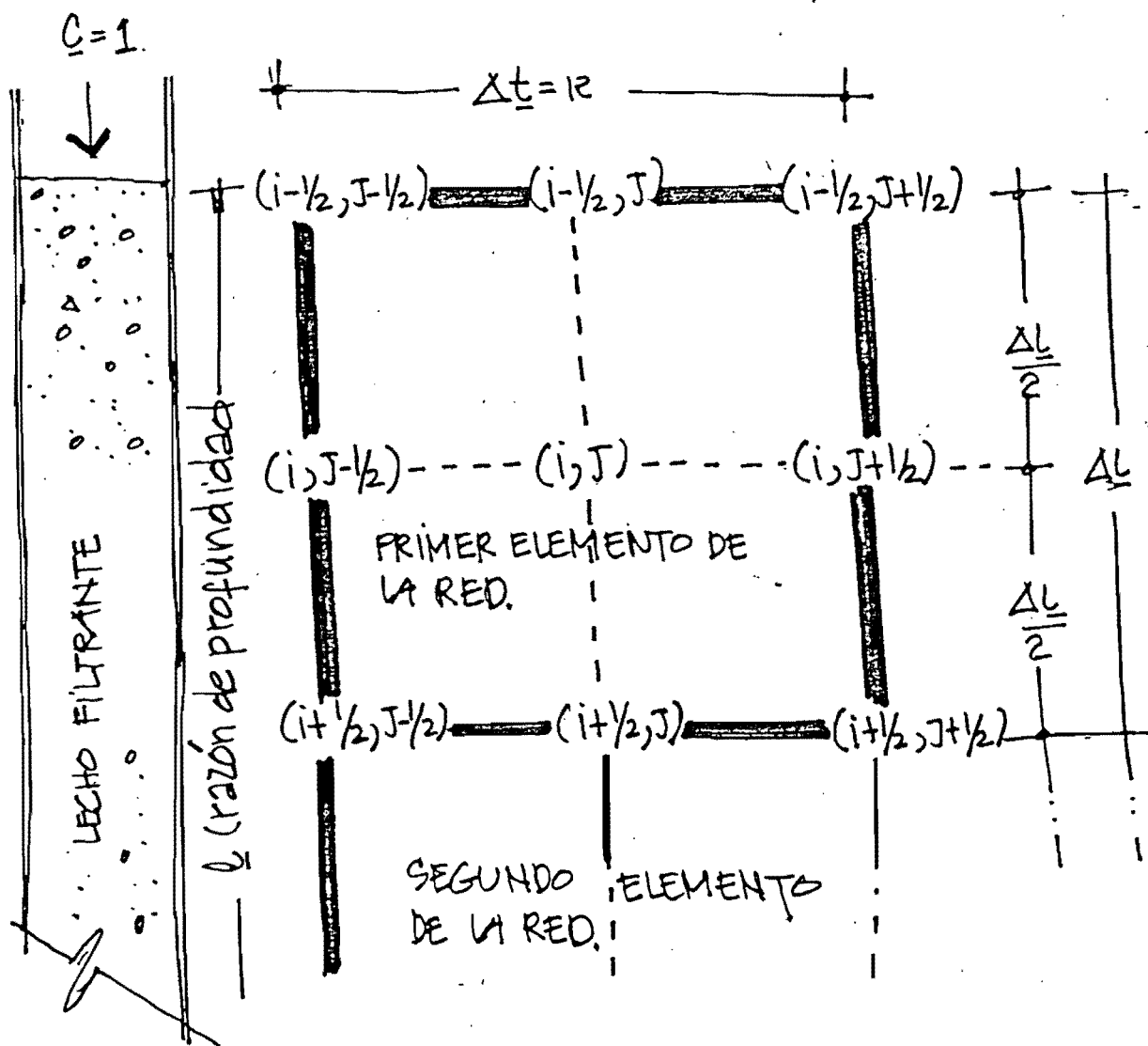


FIG N°1 REPRESENTACIÓN DE UN ELEMENTO DE LA RED DE ELEMENTOS FINITOS [9].

ESCALA DE TIEMPO ADIMENSIONAL.

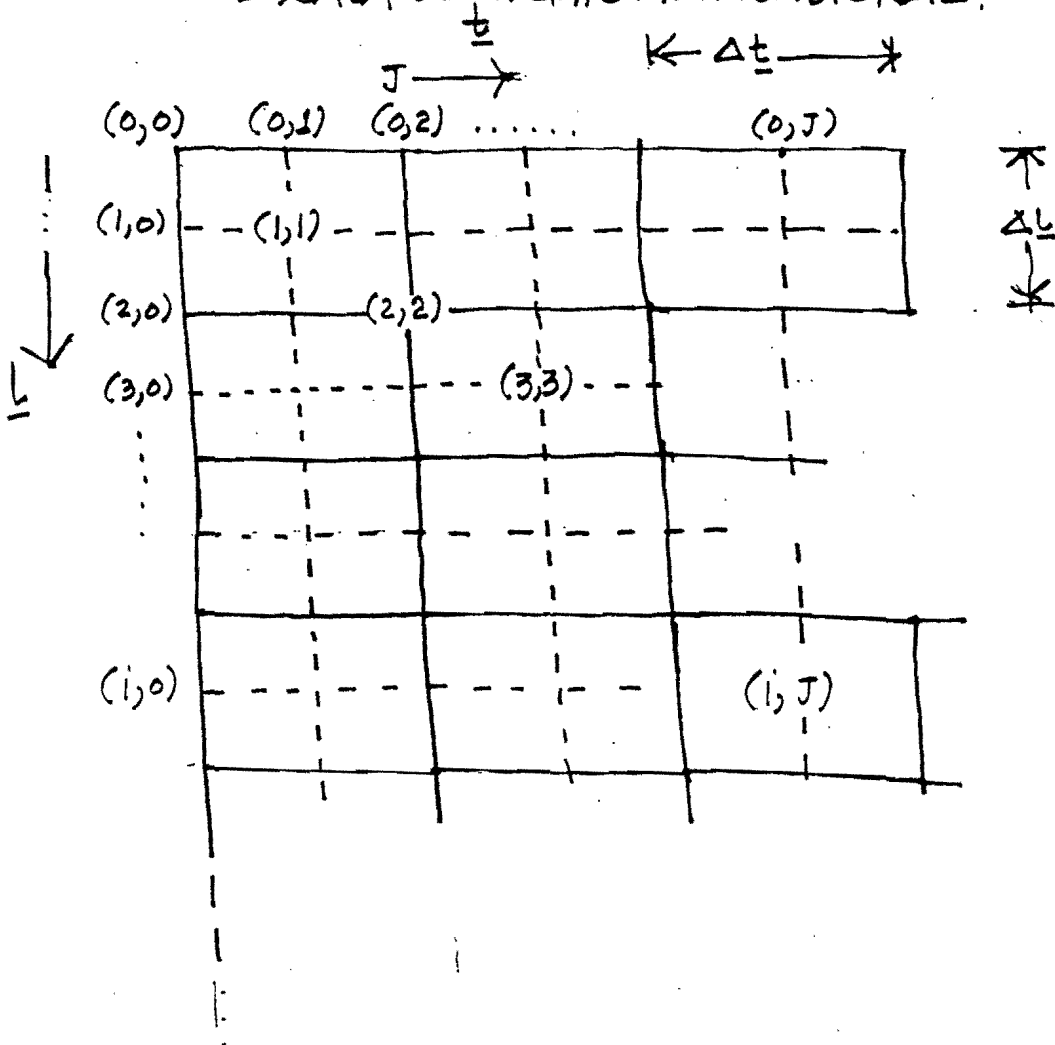


FIG No 2

ESQUEMA DE LA NUMERACIÓN DE LA RED PARA EL PROGRAMA DE COMPUTADORA.

$$\sigma_{(i,j+1/2)} = \frac{\frac{P \Delta R}{F} \left[\frac{C_{(i-1/2, j+1/2)} + C_{(i-1/2, j-1/2)}}{2} \right] - \frac{\Delta R C_{(i,j-1/2)}}{2F} + \sigma_{(i,j-1/2)}}{1 + \frac{\Delta R C}{2F}}$$

... ECUAC. 27

$$C_{(i+1/2, j+1/2)} = \frac{\left[-F \frac{(\sigma_{(i,j+1/2)} - \sigma_{(i,j-1/2)})}{R} \right] + \left[\frac{C_{(i-1/2, j+1/2)} + C_{(i-1/2, j-1/2)}}{2h} \right]}{1 + \frac{\Delta R C}{2F}}$$

$$- \frac{C_{(i+1/2, j-1/2)}}{2h} + \left[\frac{C_{(i+1/2, j-1/2)} + C_{(i-1/2, j-1/2)} - C_{(i-1/2, j+1/2)}}{2R} \right]$$

$$\left[\frac{1}{2h} + \frac{P}{2R} - \frac{(\sigma_{(i,j+1/2)} + \sigma_{(i,j-1/2)})}{4R} \right]$$

$$\left[\frac{P - (\sigma_{(i,j+1/2)} + \sigma_{(i,j-1/2)})}{2} \right]$$

..... ECUAC. N° 28

$$H_{(i+1/2, j+1/2)} = H_{(i-1/2, j+1/2)} + \frac{\partial H}{\partial t} \Big|_0 h \left[1 + G (1 - 10^{-K \sigma_{(i,j+1/2)}}) \right]$$

$$\left[\frac{P}{(P - \sigma_{(i,j+1/2)})} \right]^3 \dots \dots \dots \text{ECUAC. N° 29.}$$

Se sugiere como una opción, para imitar el proceso de filtración de ambos filtros pilotos en tiempos de filtración más allá de los ensayados, la utilización de un modelo matemático, en este caso las ecuaciones de DEB, que facilite el tratamiento de los resultados y simule el comportamiento de los lechos filtrantes en forma complementaria con los datos experimentales.

VARIABLES EXPERIMENTALES [Parte 3]

En el presente trabajo se definieron como variables experimentales de interés las siguientes:

[i] Características de los medios filtrantes.

[ii] Tasas o velocidades de filtración.

[iii] Adición de productos químicos.

Dichas variables fueron seleccionadas de acuerdo a su influencia sobre los parámetros siguientes:

[1] Capacidad de retención de cada uno de los modelos, ante una misma suspensión influente.

[2] Capacidad hidráulica del filtrado, ante una tasa de filtración efluente declinante (o descendiente).

[3] Gradiente de carga hidráulica.

Cada una de las variables citadas representan un factor importante al momento de comparar ambos modelos, sobre todo antes de emitir cualquier juicio sobre su comportamiento.

Naturalmente antes de fijar las condiciones de evaluación de dichas variables se necesitó hacer algunos ensayos previos sobre su sensibilidad ante algunos de los parámetros anteriormente enumerados. Algunas de estas pruebas son:

(P-1). Comportamiento de los lechos en presencia de un caudal influente de agua clara, ver figura N° 4; seleccionándose a partir de este ensayo las tasas de 1.5, 2.5 y 3.5 lps/m².

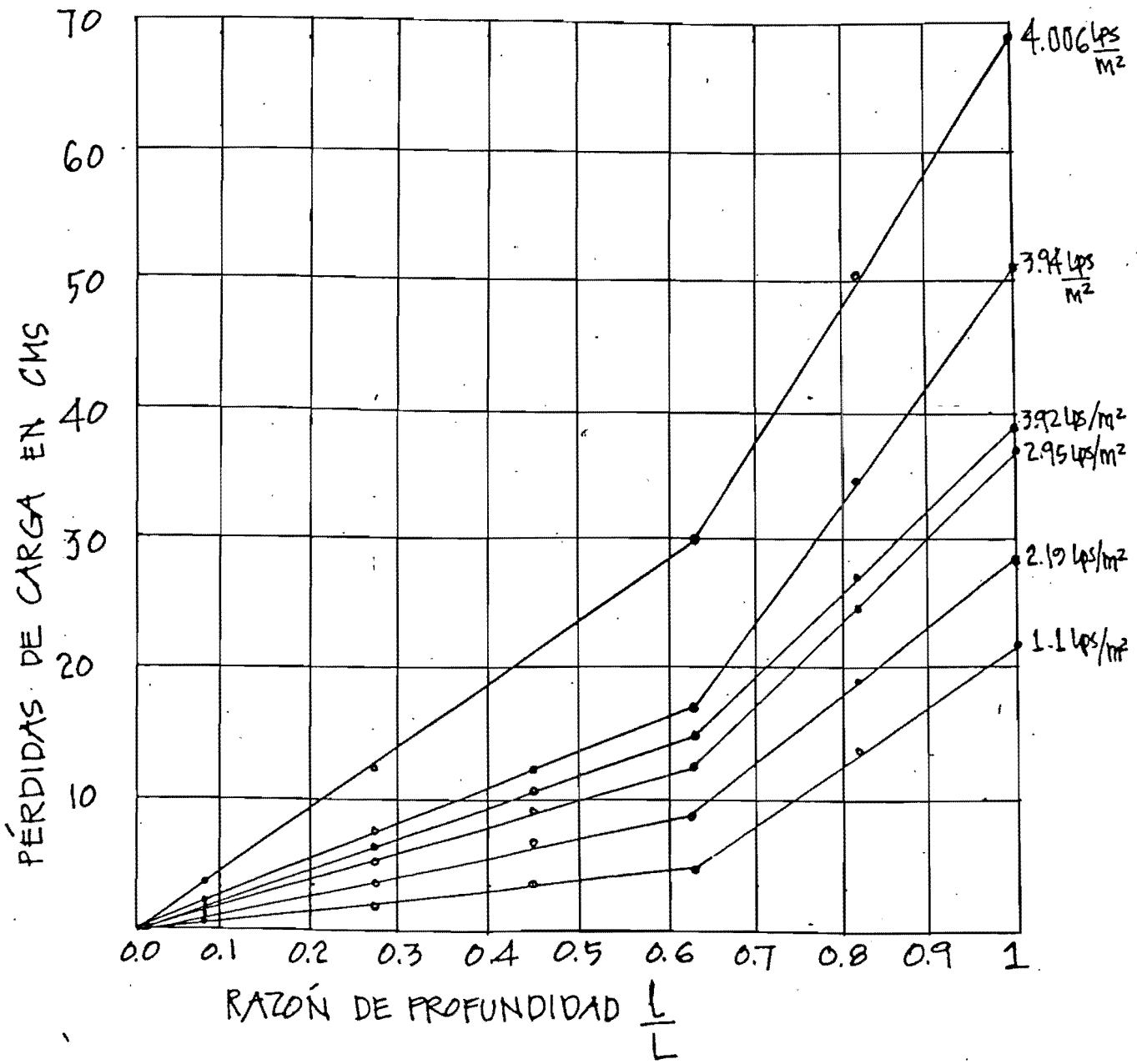


FIG N° 4

COLUMNA N° 1 (LECHO DOBLE) SOMETIDA A LAS TASAS DE FILTRACIÓN INDICADAS DE AGUA CLARA, 0.8 UNT, A 20°C Y MEDIDAS LAS PÉRDIDAS DE CARGA AL INSTANTE DE LA ESTABILIZACIÓN (FECHA DE ESTO 16 MAYO 1955).

Ya que no agotaban las cargas hidráulicas disponibles en los modelos. También permitían, estas velocidades de filtración cubrir un rango amplio de evaluación.

(P-2) Sedimentabilidad del agua sintética al estar en reposo después de ser fabricada (ver figura N° 5).

Esta prueba sirvió de base para escoger el agua con turbiedad remanente de 24 UNT después de 20 horas de reposo y que es posible fabricarla con concentraciones de arcilla de: 125 mg/lit de bentonita y 50 mg/lit de caolín.

El procedimiento para fabricación del agua problema es presentado en el anexo N° 4.

(P-3) Tratamiento químico. Ha sido ampliamente indicado^[2,5] por algunos de los investigadores sobre filtración por contacto-floculación la importancia que tiene el empleo de una dosis apropiada, tipo y forma de añadir los productos químicos sobre la calidad y producción del filtro. Sin embargo esta variable experimental tuvo que ser, lamentablemente, restringida por razones de tiempo; limitándose su evaluación únicamente a dos formas o casos experimentales:

[Caso 1] El comportamiento de ambos modelos cuando un agua, con baja turbiedad llega al filtro, sin ningún producto químico o ayuda de filtración.

[Caso 2] El comportamiento de ambos modelos cuando un agua, con una turbiedad baja, llega al filtro con la adición previa de sulfato

de aluminio y polielectrolito catiónico, bajo las tasas de filtración antes mencionadas.

La razón principal de seleccionar la combinación entre sulfato de aluminio y polielectrolito catiónico se basó en las recomendaciones hechas de que ambos productos son los más apropiados en procesos de contacto, causando fuerzas de adhesión apreciables entre la materia removida y el lecho. [2,7]

En base a todo lo anteriormente indicado se establecieron las condiciones experimentales resumidas en la TABLA N° 2.

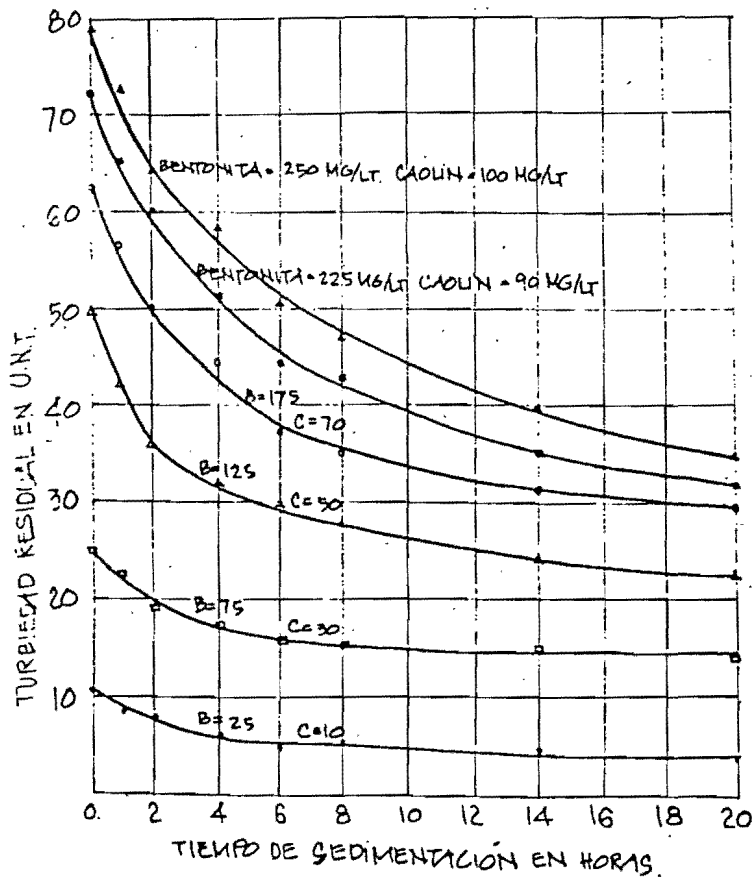


FIG N° 5
 COMPORTAMIENTO DE SEDIMENTACIÓN DEL AGUA SINTÉTICA FORMADA AL COMBINAR BENTONITA Y CAOLIN EN LAS DOSIS INDICADAS.

FECHA DEL ENSAYO 12/FEB/85

TABLA N°2

CONDICIONES EXPERIMENTALES DEL PRESENTE TRABAJO.

ASPECTO	LECHO SIMPLE	LECHO DOBLE
suspensión utilizada.	arcillas Caolín + Bentonita (50mg/l)(125mg/l)	arcillas Caolín + Bentonita (50mg/l)(125mg/l)
Productos químicos:	(A) Sin (B) sulfato de aluminio 60 mg/l Polielectrolito catiónico 9.000625 ml/l	similar (A) y (B)
Porosidad	$P_0 = 0.3745$	$P_{\text{antarcita}} = 0.5668$ $P_{\text{arena}} = 0.3479$
Tasas de filtración en lps/m ²	1.5, 2.5	1.5, 2.5 y 3.5
Temperatura °C	20°C	20°C
C_0 promedio	24 UNT	24 UNT.
observaciones:	C medida en UNT y transformada a C/C ₀ .	C medida como turbiedad U.N.T.

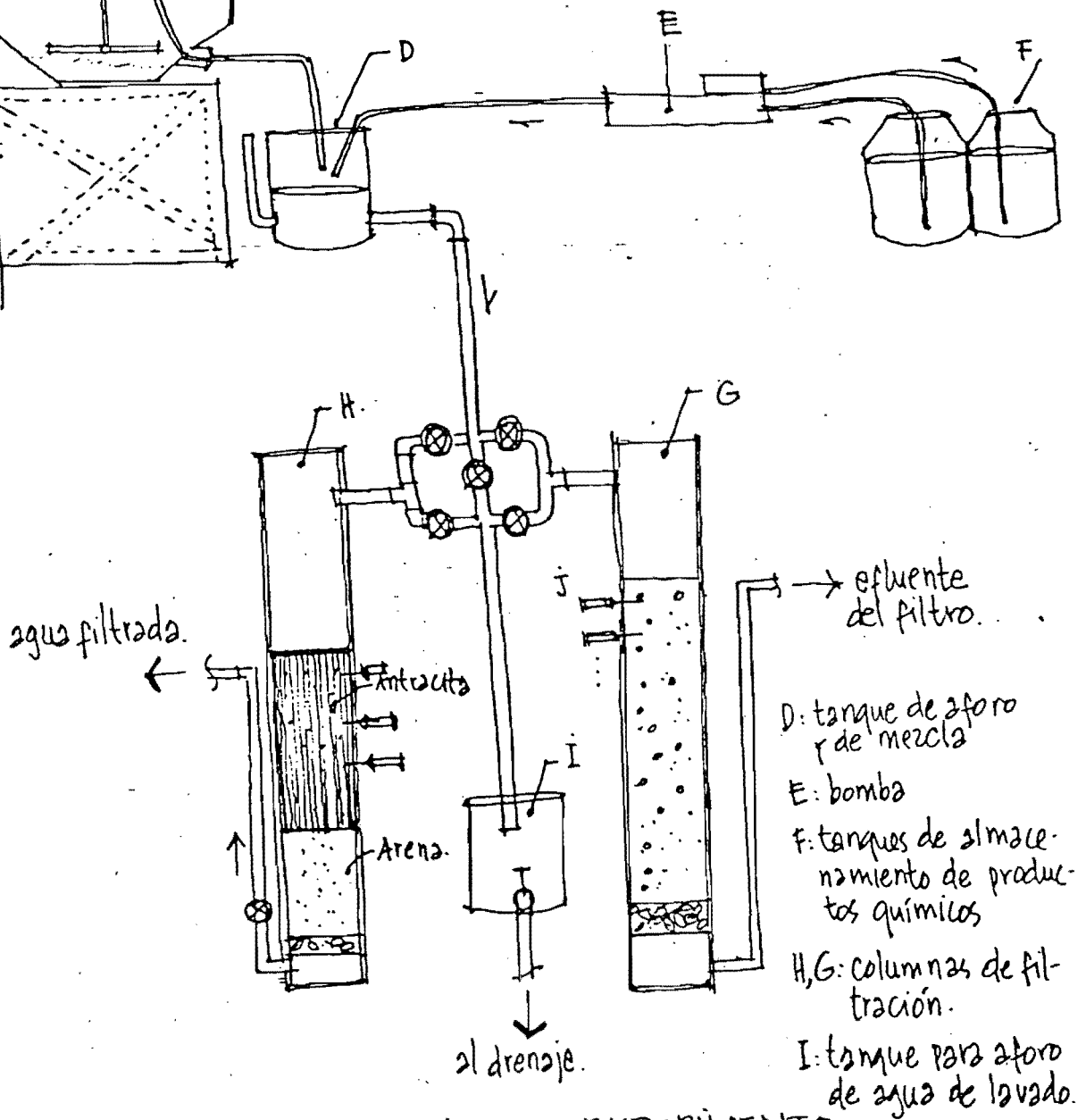
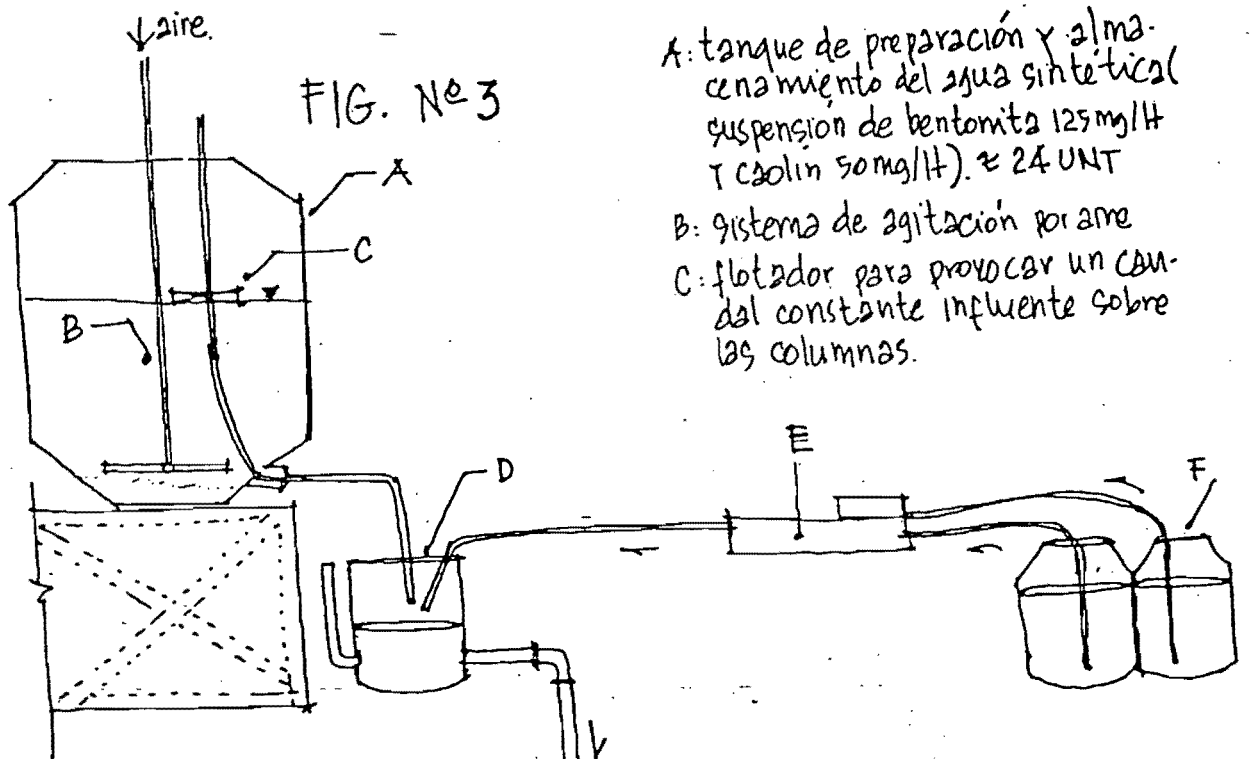
* P_0 = porosidad del lecho limpio.

MODELOS DE LABORATORIO.

El modelo experimental utilizado en el presente trabajo fue diseñado y construido por el ING CORONADO durante la realización de su tesis de grado; consiste de dos columnas de filtración a escala piloto.

La instalación experimental empleada aparece esquematizada en la figura N°3; básicamente el modelo está formado por los siguientes componentes:

- [1] Tanques de almacenamiento de la suspensión.
Consiste en dos tanques de asbesto-cemento de 1000 litros de capacidad, en los cuales se almacena el agua problema. Al realizar las adaptaciones indicadas en el anexo N°2 su capacidad de almacenamiento se vio reducida en un 5%.
- [2] Sistema de agitación por aire.
Es una tubería de $\frac{3}{8}''\phi$, que permite la inyección de aire presurizado para lograr la homogenización del agua sintética al momento de su fabricación.
- [3] Columnas de filtración.
Son dos columnas de acrílico, con 5mm de espesor y de sección cuadrada con una separación de 15 x 15 cms una y de 13 x 13 cms la otra (ver literales G y H fig. N°3); La altura total de ambas es de 210 cms y de 197 cms respectivamente.



ESQUEMA DEL MONTAJE DEL EXPERIMENTO.
FIG No 3

[4] Conexiones para distribución del agua influente, efluente del agua filtrada y entrada de agua y aire para el retrolavado.

[5] Bomba dosificadora de productos químicos (ayudas de filtración).

[6] Materiales filtrantes.

La columna n^o 1, indicada por una "H" en la figura N^o 3, fue empacada con un medio dual (arena-antracita), soportada por un lecho de grava aluvial; la tabla N^o 3 resume las características principales de ambos lechos.

La columna n^o 2, fue empacada con un medio único consistente de arena gruesa, soportada por un lecho de grava. La tabla N^o 3 resume las características de este material filtrante.

[7] Tanques de almacenamiento de los productos químicos, con capacidad para 45 litros.

[8] Flotador adaptable para provocar un caudal constante influente sobre las columnas.

[9] Tanques para aforo del caudal influente, efluente y de lavado.

TABLA N°3

MATERIALES FILTRANTES COMPONENTES DE LAS COLUMNAS N°1 Y N°2 ; SEGÚN PRÁCTICAS AMERICANA Y EUROPEA RESPECTIVAMENTE.

(A) COLUMNA N°1 LECHO DOBLE			
Material	Espesor del lecho.	Tamaño efectivo	Coefficiente de uniformidad
ANTRACITA	45 cms	0.88 mm	1.53
ARENA	26 cms	0.47 mm	1.56
(B) COLUMNA N°2 LECHO SIMPLE			
ARENA	110 cms	0.93 mm	1.55

PROGRAMA EXPERIMENTAL.

Las condiciones experimentales establecidas en la parte tercera del presente trabajo definieron las cinco pruebas de filtración (trabajando con ambos modelos simultáneamente) son resumidas en la TABLA N°4.

Toda la información experimental recopilada tanto en las pruebas preliminares citadas en la parte N°3 como las indicadas en la tabla N°4 son procesadas en el presente apartado; así mismo se presentan ejemplos de los principales cálculos que se ejecutaron para determinar las variables experimentales de filtración definidas por DEB.

También se agregan los resultados obtenidos al ejecutar el programa de computadora alimentado con la información experimental obtenida.

La evaluación de ésta y el resto de las partes es discutida en el apartado N°6.

TABLA N°4
PRUEBAS DE FILTRACIÓN EJECUTADAS (EN AMBAS COLUMNAS)

PRUEBA N°	TURBIEDAD. PROMEDIO.	TASA DE FILTRACIÓN	CONDICIÓN DE DOSIFICACIÓN
1	24 UNT.	1.4 LPS/M ²	CASO 2 (CON)
2	24 UNT	1.4 LPS/M ²	CASO 1 (SIN)
3	24 UNT	3 LPS/M ²	CASO 1 (SIN)
4	26 UNT	2.5 LPS/M ²	CASO 2 (CON)
5	24 UNT	3.5 LPS/M ²	CASO 2 (CON)
PRELIMINARES	0,8 UNT	1.1, 2.19, 2.95, 4.006.	CASO 1 (SIN).

CÁLCULO DE LA POROSIDAD INICIAL DE CADA UNO DE LOS LECHOS UTILIZADOS.

COLUMNA N° 1. FILTRO PILOTO CON LECHO DOBLE

Disposición de los lechos en la columna ver figura n° 6-A

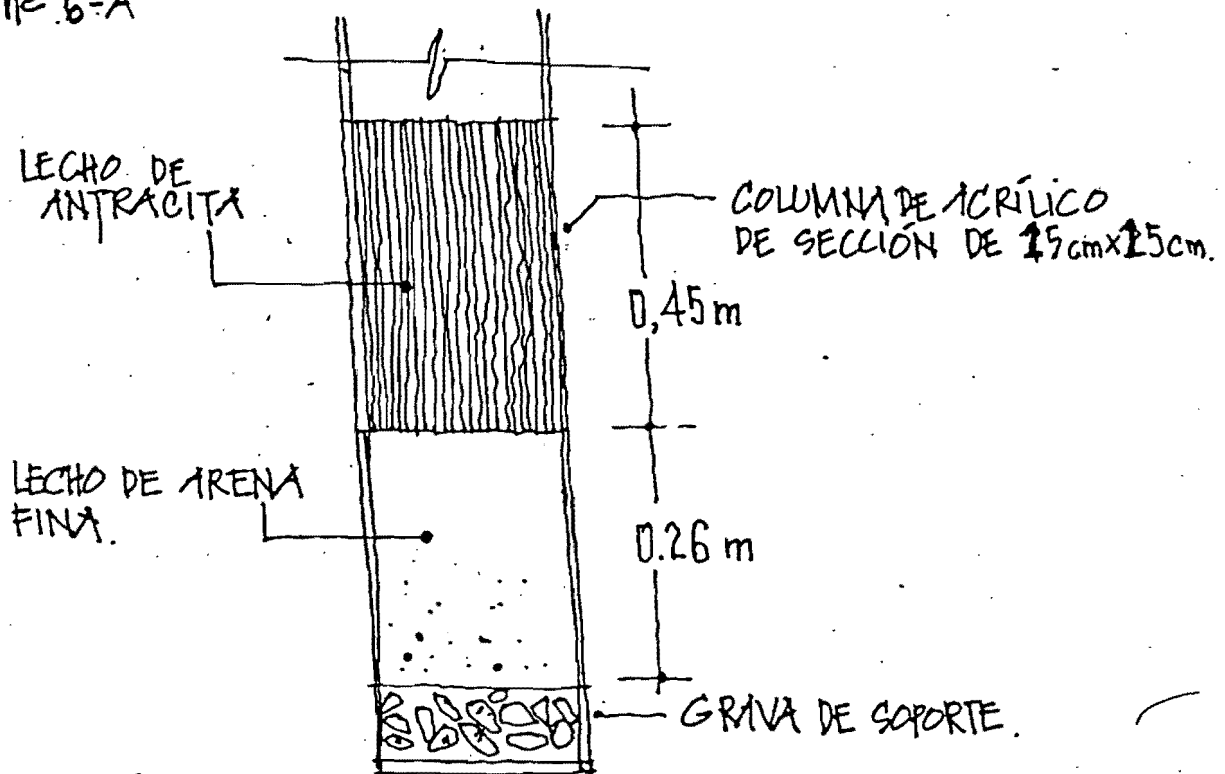


FIG N° 6-A

-Cálculo de la porosidad inicial del lecho de arena:

Datos:

$A = \text{área de la sección transversal} = 0.15 \times 0.15 = 0.0225 \text{ m}^2$

$L = \text{altura del lecho de arena} = 0.26 \text{ m.}$

$W = \text{peso de la arena requerido para el empaque} = 9.46 \text{ kg}$

$\gamma_s = \text{densidad de la arena} = 2,480 \text{ KG/M}^3$

para el cálculo de la porosidad usaremos la expresión

$$P_0 = 1 - \left[\frac{(W/A)}{\gamma_s L} \right] \dots \dots \dots \text{EQUAC. N}^\circ 30$$

Sustituyendo valores:

$$P_0 = 1 - \left[\frac{(9.46 \text{ KG} / 0.0225 \text{ m}^2)}{2.480 \frac{\text{KG}}{\text{m}^3} (0.26 \text{ m})} \right] = 0.3479$$

- Cálculo de la porosidad del lecho de antracita:

Datos:

$$L = 0.45 \text{ m.}$$

$$W = 7.75 \text{ KG.}$$

$$\gamma_s = 1,767 \text{ KG/m}^3$$

$$A = 0.0225$$

$$\therefore P_0 = 0.5668$$

COLUMNA N°2 FILTRO PILOTO DE LECHO SIMPLE.

Disposición del lecho ver figura N°.6-B.

- Cálculo de la porosidad del lecho de arena gruesa:

Datos:

$$A = 0.0169 \text{ m}^2 (= 0.13 \text{ m} \times 0.13 \text{ m}).$$

$$L = 1.10 \text{ m.}$$

$$W = 30.8 \text{ KG}$$

$$\gamma_s = 2649 \frac{\text{KG}}{\text{m}^3} \quad \therefore P_0 = 0.3745$$

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ESFERICIDAD C_e Y DEL FACTOR DE FORMA DEL GRANO LIMPIO f'

COLUMNA N°1 FILTRO PILOTO CON LECHO DOBLE

Datos: LECHO DE ANTRACITA

Área de la columna = $0,0225 \text{ m}^2 = A$

P_0 = Porosidad inicial del lecho limpio = $0,5668$

v = velocidad de filtración = $0,11 \text{ cm/s}$

H_0 = Pérdidas de carga iniciales en el lecho de antracita
= $4,5 \text{ cms}$

Temperatura del agua = 20°C

ν = viscosidad cinemática del agua a $20^\circ \text{C} = 1,0105 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

$L = 45 \text{ cm}$ (Espesor del lecho).

Cálculos:

Para determinar C_e lo despejaremos de la expresión para pérdidas iniciales de carga para un lecho formado por partículas no-esféricas, ni uniformes y estratificadas: [3]

$$H_0 = \frac{f' v}{g} \sqrt{\frac{L(1 - P_0)^2 (36)}{P_0^3 C_e^2}} \left[\sum_{i=1}^i \frac{x_i}{(d_i)^2} \right] \dots \dots \dots \text{EQUAC. 31}$$

donde, además de los parámetros ya definidos:

g = Gravedad = $981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$

C_e = Coeficiente de esfericidad.

L = altura del lecho = 45 cms .

x_i = tanto por ciento de partículas retenidas entre dos tamices consecutivos.

$f' = 5$

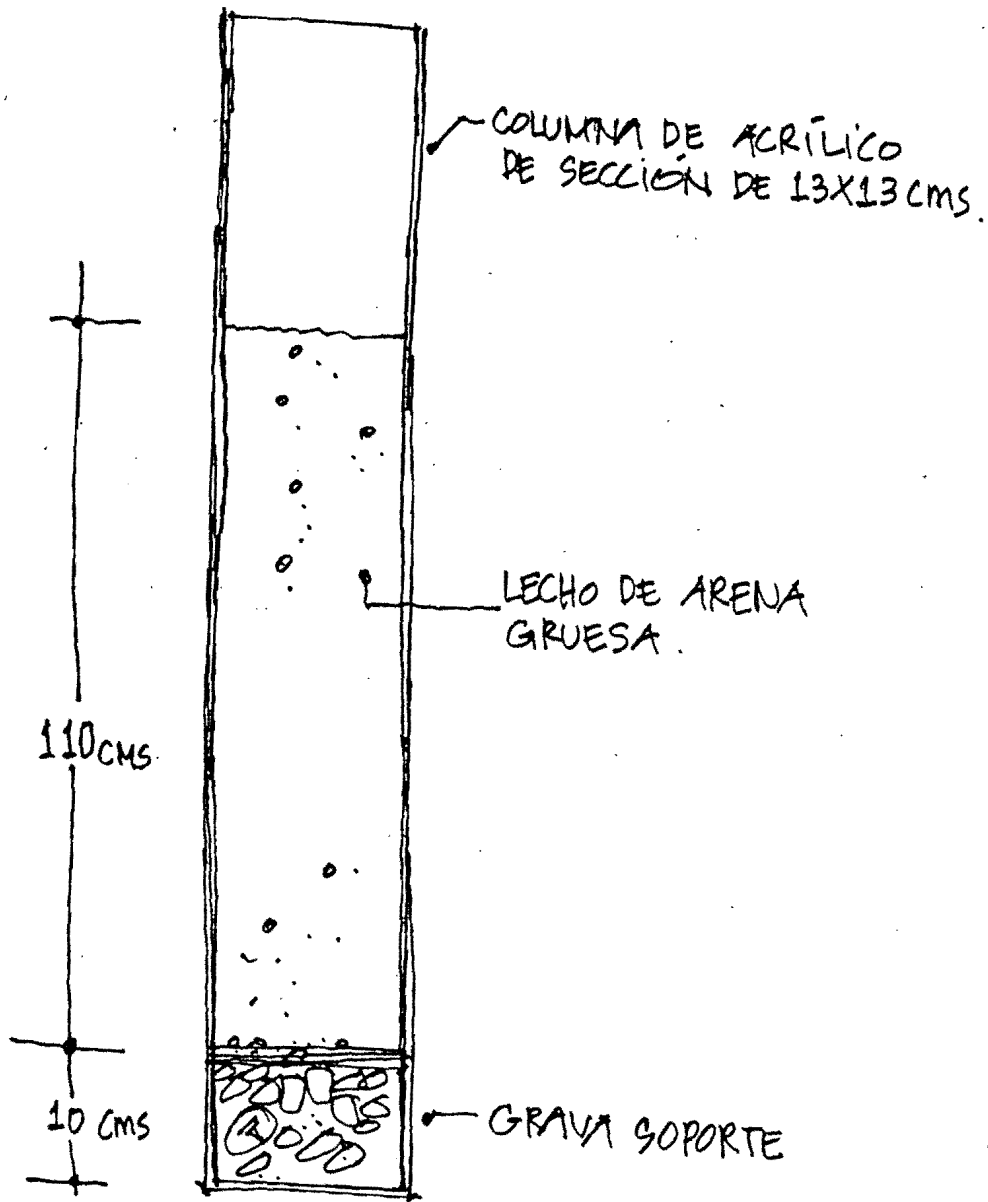


FIG-6-B.
Detalle del lecho de arena en la columna de lecho simple (práctica europea).

d_i = diámetro promedio geométrico, entre dos cedazos

cálculo del valor $\left[\sum \frac{x_i}{(d_i)^2} \right]$:

d_i mm.	% RET = x_i	$(d_i)^2$ cm^2	$x_i / (d_i)^2$
2.19	7.02	0.0479	1.46
1.42	11.34	0.0201	5.62
0.65	78.117	0.0042	184.89
0.333	3.477	0.0011	30.98

TABLA N° 5.
cálculo del valor
de $\left[\sum \frac{x_i}{d_i^2} \right]$

$$\sum \frac{x_i}{(d_i)^2} = 222.96 \text{ cm}^{-2}$$

$$H_0 = \frac{5 (1.0105 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}) 0.11 \text{ cm/s} \left(\frac{36}{C_e^2} \right) 45 \text{ cm} (1 - 0.5668)^2}{981 \text{ cm/s}^2 (0.5668)^3} 222.96 \text{ cm}^{-2}$$

$$H_0 = \frac{2.1089}{C_e^2} \text{ cm.}$$

$$\therefore C_e = \sqrt{\frac{2.1089}{H_0}} = \sqrt{\frac{2.1089}{4.5}} = 0.6846$$

$$\psi = \left[\frac{6}{\text{coef. de esfericidad}} \right] = \frac{6}{C_e} = \frac{6}{0.6846}$$

$$\therefore \psi = 8.7645$$

LECHO DE ARENA.

En forma similar al cálculo anterior se realiza la determinación del coeficiente de esfericidad, C_e , y del factor de forma del grano limpio de las partículas de arena.

Datos:

$$A = 0,0225 \text{ m}^2$$

$$P_0 = 0,3476$$

$$V = 0,11 \text{ cm/s}$$

$$H_0 = 18 \text{ cms}$$

$$T^\circ = 20^\circ\text{C}$$

$$\sum \frac{x_i}{(d_i)^2} = 312,98 \text{ cm}^{-2}$$

$$L = 26 \text{ cms}$$

$$\nu = 1,0105 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$H_0 = \frac{16,8194}{C_e^2} \text{ cm.}$$

$$C_e = \sqrt{\frac{16,8194}{18}} = 0,9666$$

$$\psi = \frac{6}{C_e} = \frac{6}{0,9666} = 6,21$$

= COLUMNA N°2 FILTRO PILOTO CON LECHO SIMPLE

Para calcular C_e lo despejaremos de la expresión para pérdidas iniciales de carga para un lecho formado por partículas: no-esféricas, ni uniformes y sin estratificación: [5]

$$H_0 = \frac{f' L v}{8} \sqrt{\frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \left[\frac{6}{C_e} \sum_{i=1}^i \frac{x_i}{d_i} \right]^2} \quad \text{EQUAC.32}$$

Datos:

$$f' = 5$$

$$L = 110 \text{ cms}$$

$$T = 20^\circ \text{C} \quad \nu = 1.0105 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$P_0 = 0.3745$$

$$\sum \frac{x_i}{d_i} = 8.4740 \text{ cm}^{-1}$$

$$v = 0.14 \text{ cm/s}$$

$$H_0 = 19 \text{ cms}$$

$$H_0 = \frac{15.27}{C_e^2} \text{ cms}$$

$$\therefore C_e = \sqrt{\frac{15.27 \text{ cms}}{19 \text{ cms}}} = 0.8966$$

$$\psi = \frac{6}{C_e} = \frac{6}{0.8966} = 6.69$$



CARRERA DE FILTRACIÓN N°1
 TASA DE FILTRACIÓN 1,005 LPS/M²
 DOSIS DE SULF. DE ALUMINO 10MG/LT
 DOSIS DE POLIELECTROLITO = 0,000625 ml/l.
 T° = 20.5°C.

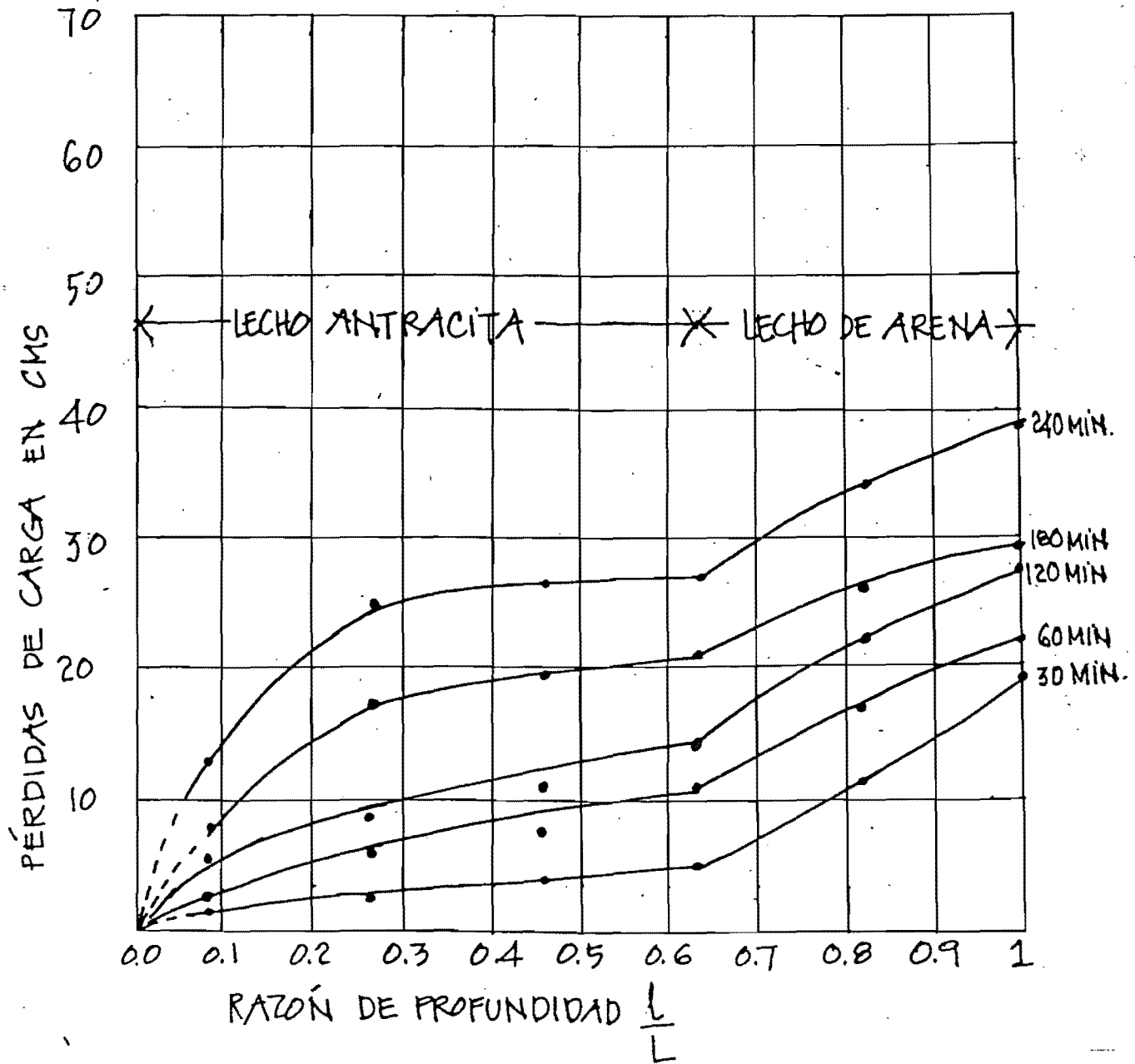


FIG N° 7
 COLUMNA N°1, LECHO DOBLE
 PRÁCTICA AMERICANA.

CARRERA DE FILTRACIÓN N°1
 TASA DE FILTRACIÓN 1.4 LPS/M²
 DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO 10 NG/LT
 DOSIS DE POLIELECTROLITO = 0,000625 ml/Lt
 T° = 20.5 °C

t = 240 MIN.

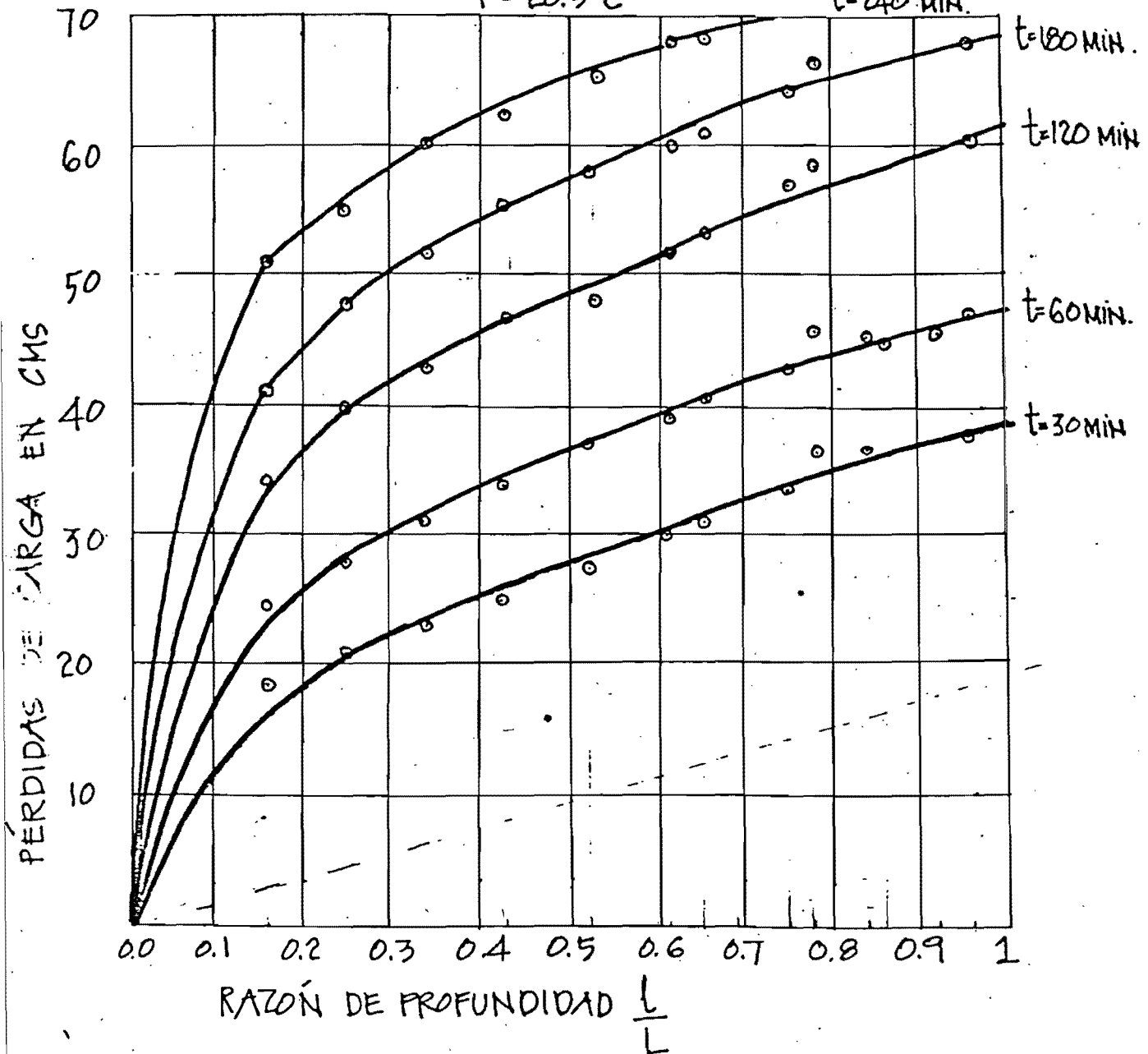


FIG N° 8

COLUMNA N°2, LECHO SIMPLE DE ARENA.
 PRÁCTICA EUROPEA
 PRUEBA DETERMINAR PRODUCIRSE 2 UNT EN EL EFLENTE

FIG. N°9

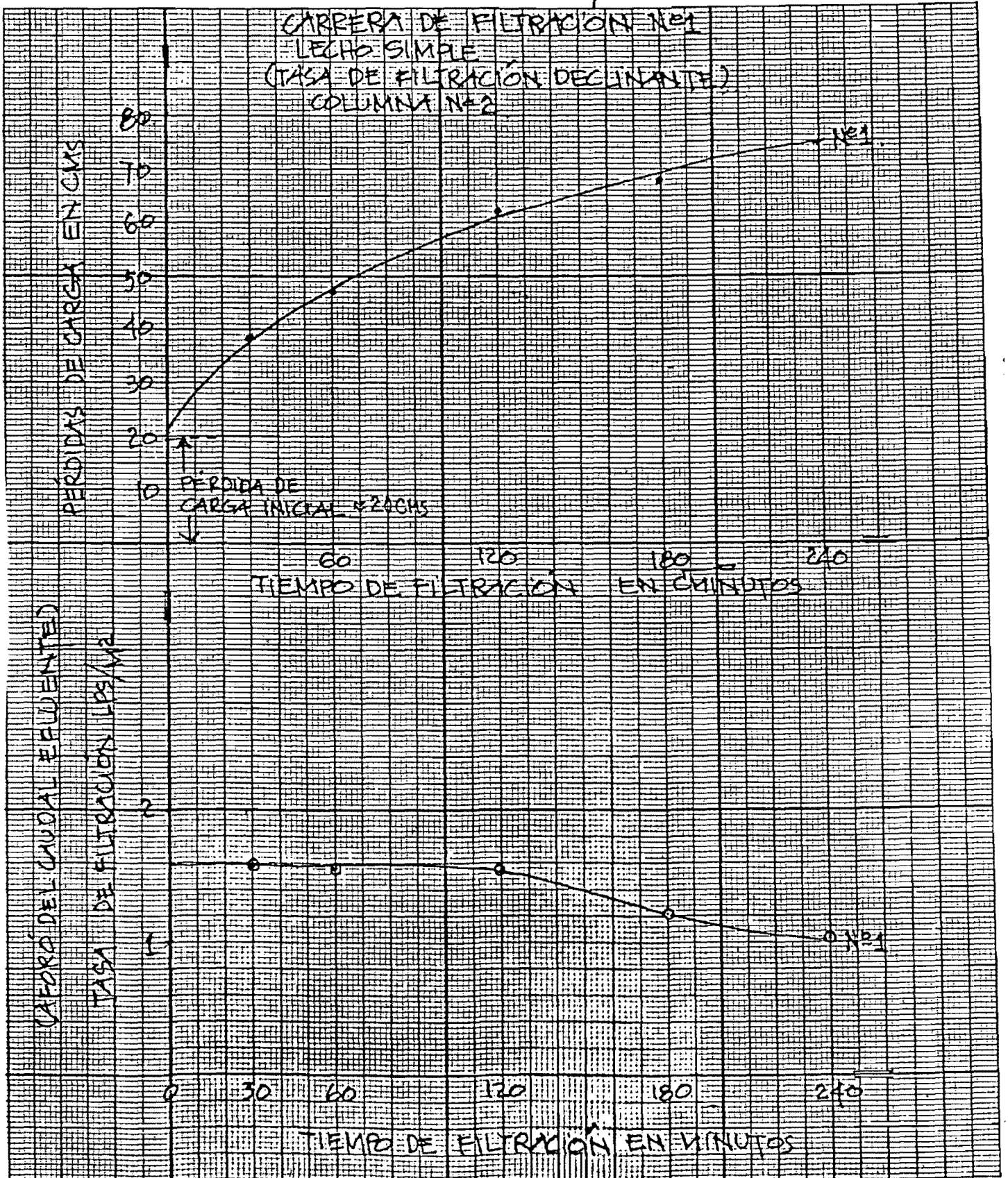
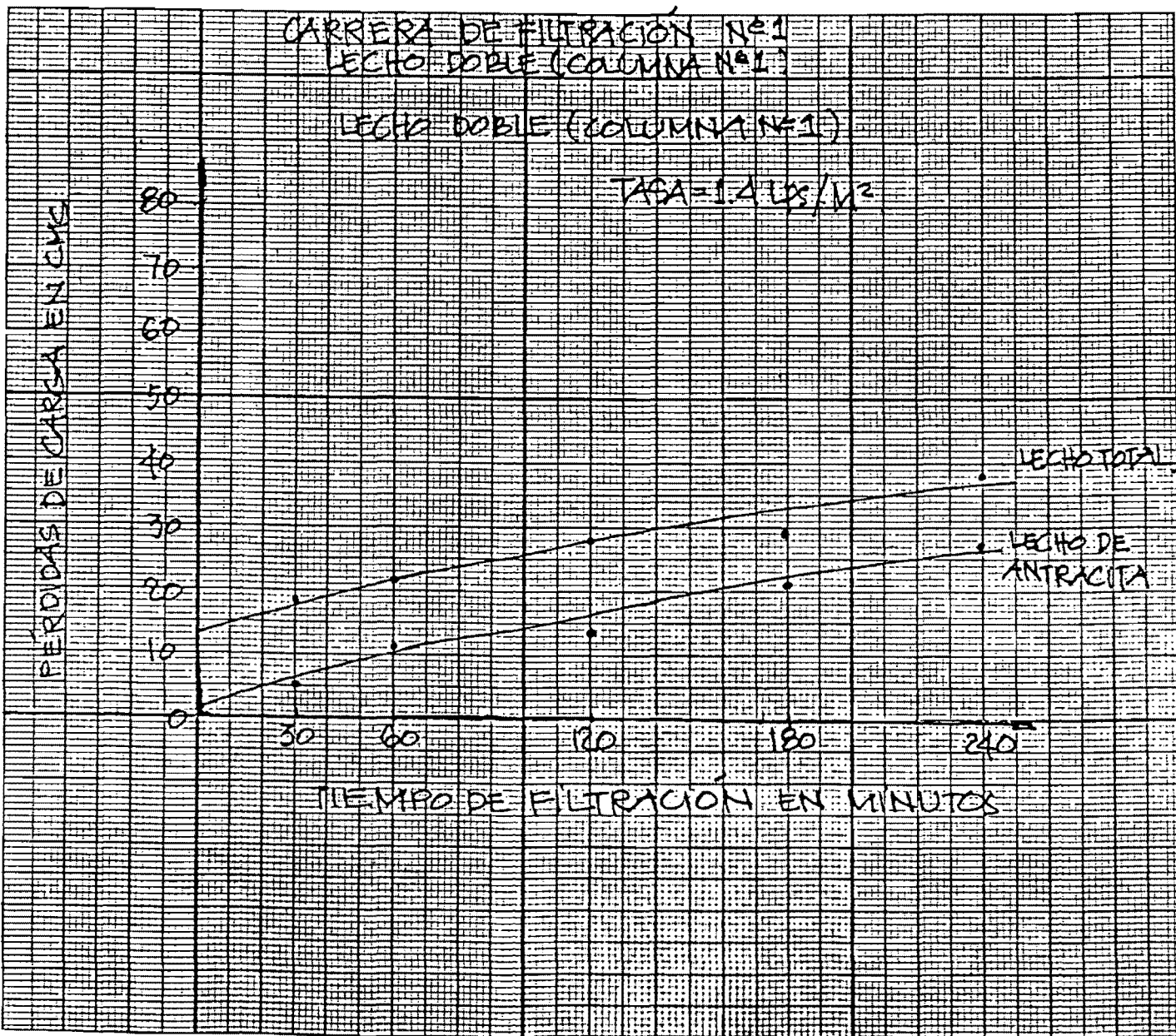


FIG N° 10

DISTRIBUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL TIEMPO (CARRERA DE FILTRACIÓN N° 1)



CARRERA DE FILTRACIÓN, N°2 y N°3.
SIN AYUDAS DE FILTRACIÓN

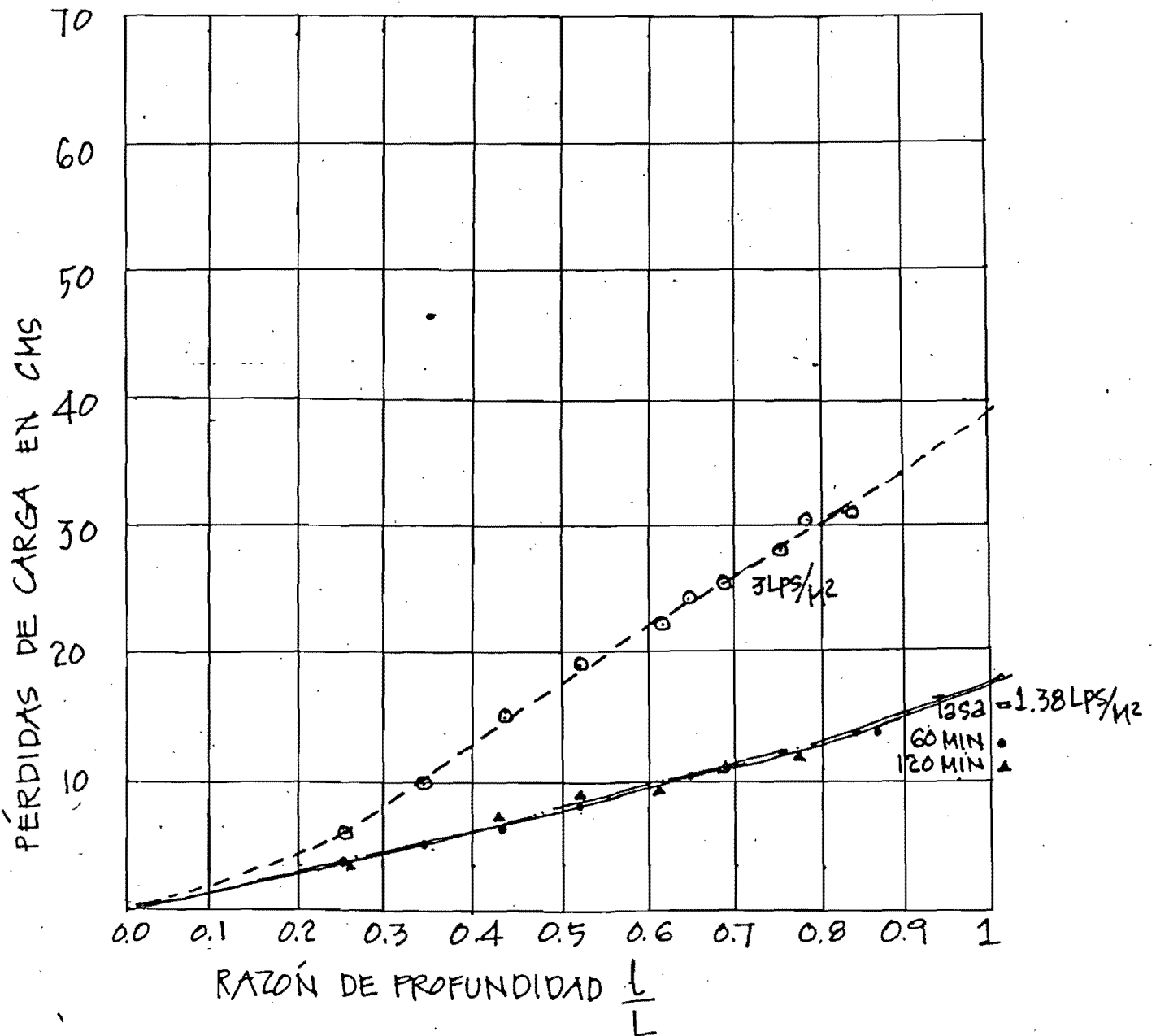
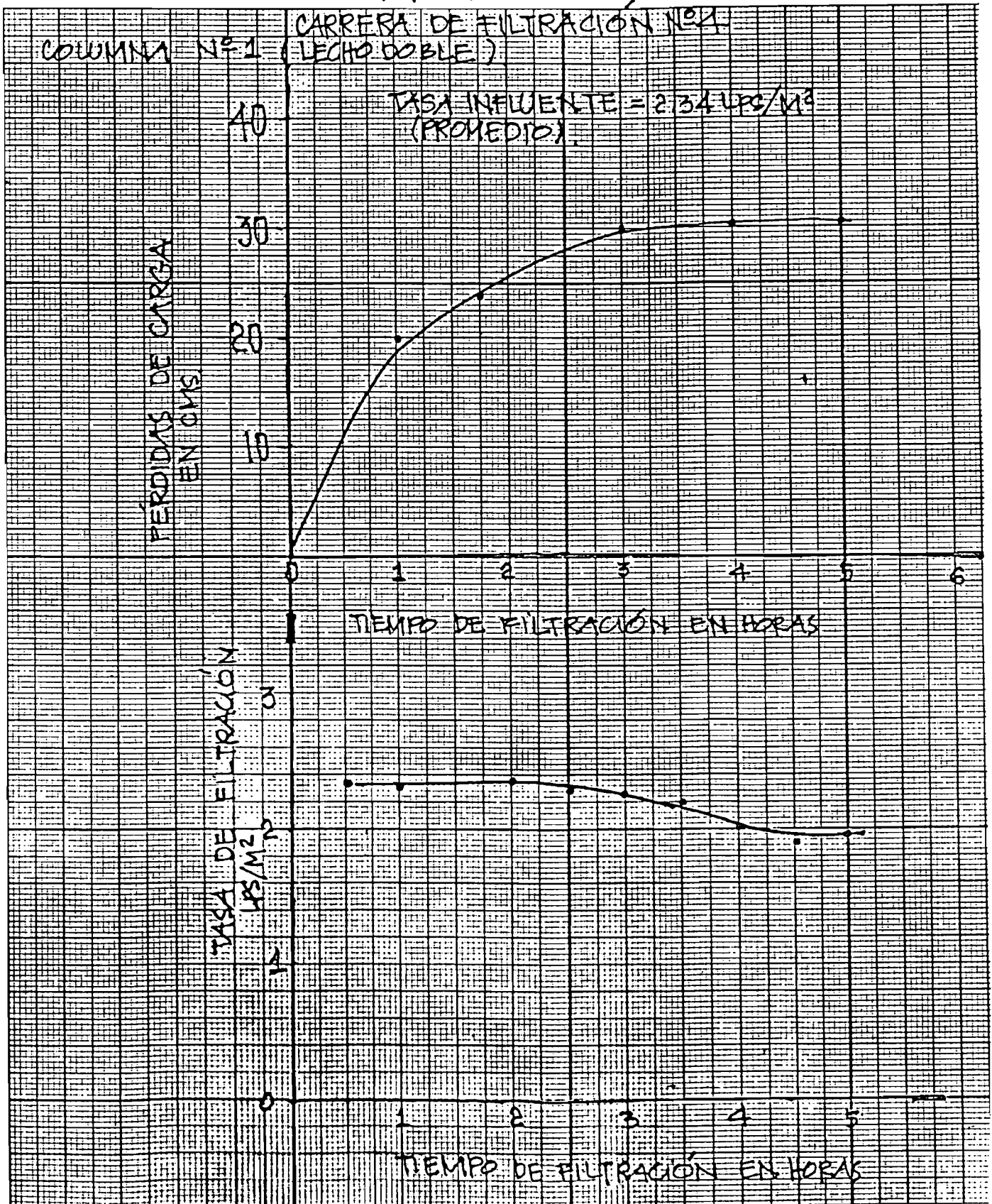


FIG N° 11

COLUMNA N°2, LECHO SIMPLE DE ARENA
PRÁCTICA EUROPEA

TURBIEDAD INFLUENTE PROMEDIO 24 UNT.
NO SE APLICO NINGUNA AYUDA DE FILTRACIÓN.

FIG. N° 12



CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE PÉRDIDA DE CARGA K Y G COLUMNA N°2 (LECHO SIMPLE)....

A continuación se presentan los pasos seguidos para hacer la determinación de los parámetros K y G de las ecuaciones propuestas por A. DEB

$$h = h_0 \left[1 + G(1 - 10^{-K\sigma}) \right] \left[\frac{P_0}{P_0 - \sigma} \right]^3 \dots\dots\dots (*) \text{ ECUAC. 25}$$

también usaremos las expresiones: ECUAC - 62 de la ref [8]

$$\frac{J\psi^2}{J_0\psi_0^2} = \frac{h}{h_0} \left[\frac{P_0 - \sigma}{P_0} \right]^3 \dots\dots\dots (*) \text{ ECUAC. N° 33}$$

ECUAC 59 de la ref [8]

$$\log \left[1 - \frac{[\psi^2 J / \psi_0^2 J_0] - 1}{G} \right] = -K\sigma \dots\dots\dots (*) \text{ ECUAC. N° 34}$$

ECUAC. 61 de la ref [8, 9]

cálculos:

El cálculo del depósito específico fue realizado, empleando las enseñanzas del ing. GASTÓN MENDOZA, basándose sobre la consideración de que las variaciones sufridas por el gradiente hidráulico son provocadas por los depósitos sobre los granos.

Los cálculos son presentados en la TABLA N°6

(ver hoja siguiente).

Datos: (pertenecientes a la carrera N°1)

$P_0 = 0.3745$ $J_0 = f^N = 5$ $v = 0.14 \text{ cm/s}$ $H_0 = 19 \text{ cms}$

$L = 110 \text{ cms}$ $\psi_0 = 6.69$ $\nu = 1.0105 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ (@20 °C)

(*) Las definiciones de cada término son presentados en el ANEXO 3.

TABLA N° 6

Cálculo del depósito específico:

H_{cms}	$h = H/L$	h/h_0	$\frac{J_4^2 v}{S} \left[\frac{1}{L_0} \right]^2$	$\frac{[1-P]^2}{P^3}$	P	$\frac{cm^3}{cm^3}$ σ
19 = H_0	$h_0 = 0.1727^*$	1	0.02316	7.45	0.3745	0.
38	0.345	1.997	0.02316	14.896	0.3161	0.06
47.	0.427	2.47	0.02316	18.44	0.298	0.076
62	0.563	3.26	0.02316	24.31	0.278	0.096
68	0.618	3.58	0.02316	26.68	0.271	0.103
78	0.709	4.106	0.02316	30.61	0.2615	0.113

H_0 = pérdidas iniciales

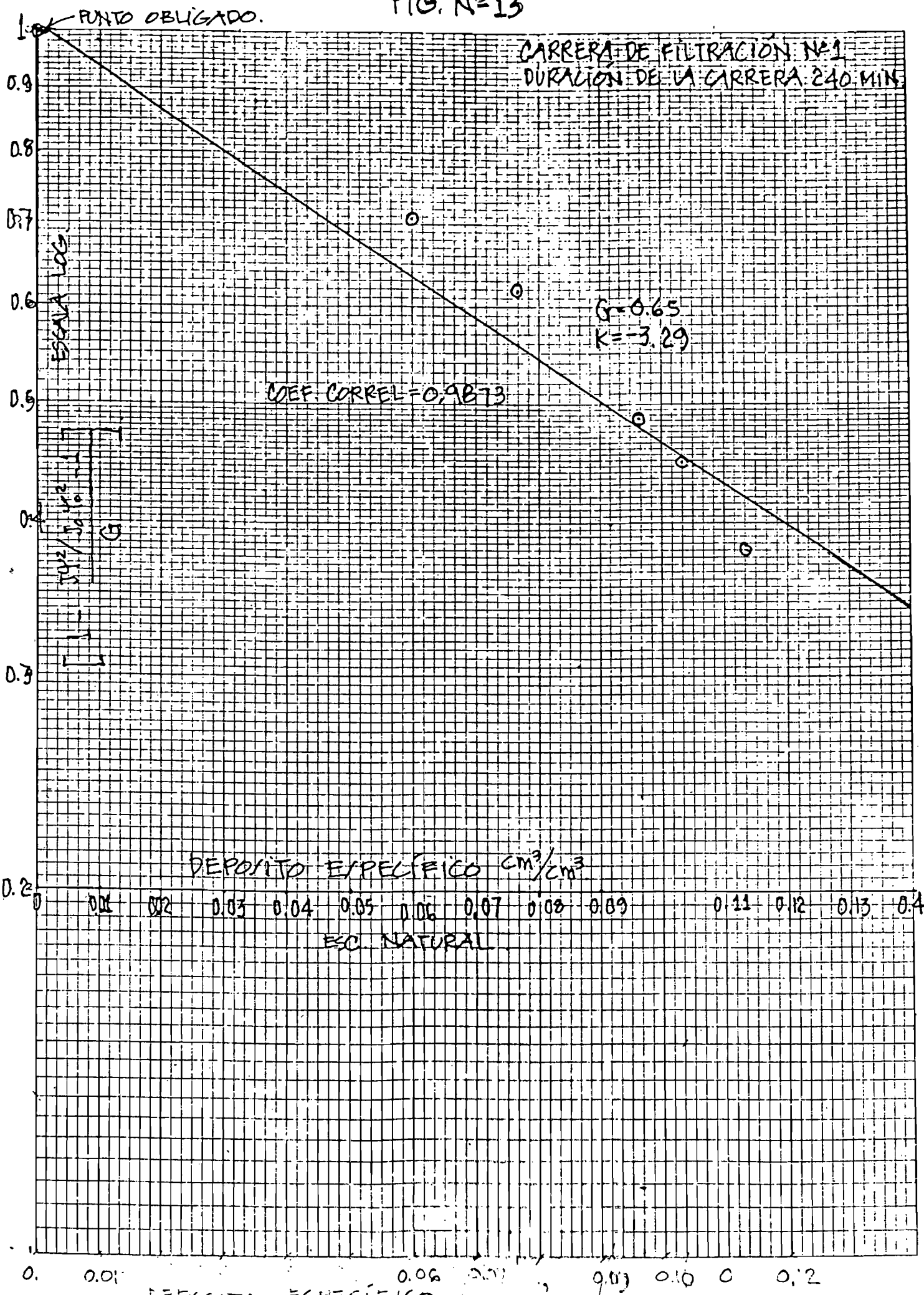
$$* h_0 = H_0/L = \frac{19}{110}$$

cálculo del término $\frac{J_4^2}{J_0^4} = \frac{h}{h_0} \left[\frac{P_0 - \sigma}{P_0} \right]^3 \dots \dots \dots$ ECUAC. 33

σ	$\frac{J_4^2}{J_0^4} = \frac{h}{h_0} \left[\frac{P_0 - \sigma}{P_0} \right]^3$
0.	1.0000
0.06	1.1827
0.0765	1.2443
0.0965	1.333
0.1035	1.356
0.113	1.397

TABLA N° 7.

FIG. N° 13



para determinar los valores de G y K se procede por tanteos asumiendo inicialmente un valor de G y graficando los valores, en papel semilogarítmicos, de:

$$\sigma \text{ vrs } \left[1 - \frac{Jq^2/J_0q^2 - 1}{G} \right]$$

luego deberá buscarse la recta que de el mejor ajuste, sin olvidar el punto obligado $\sigma=0$, $[1 - (q^2/J_0q^2 - 1)/G] = 1$

Haciendo lo anterior, K será la pendiente de la recta de mejor ajuste y G el valor asumido.

Los valores de G y K para esta etapa de cálculos fueron:

$$G = 0.65$$

$$K = 3.29$$

Con un coeficiente de correlación = 0.9873

Gracias a estos valores se pudo trazar las curvas de las FIG N° 14 y N° 15

FIG. N° 14

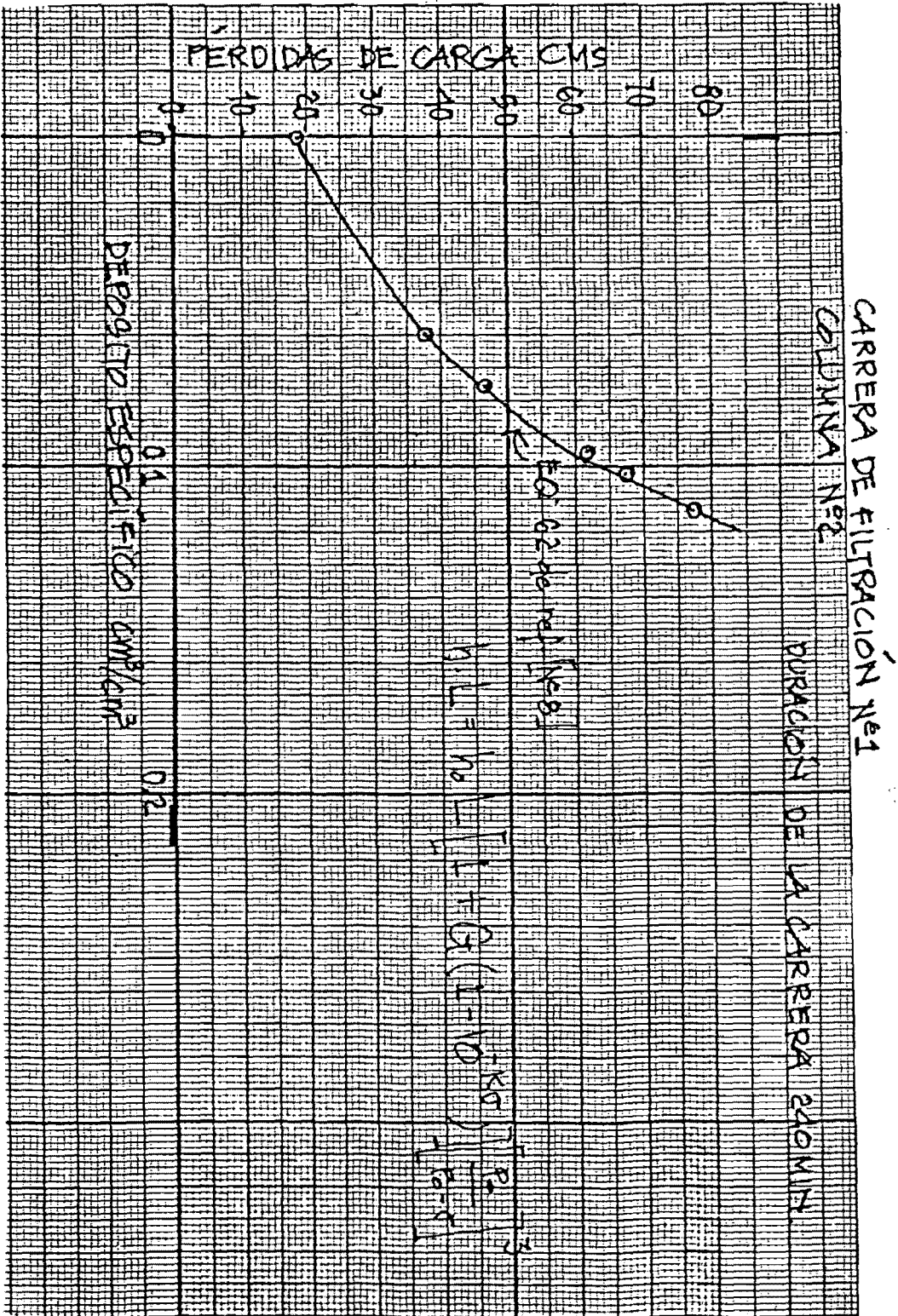
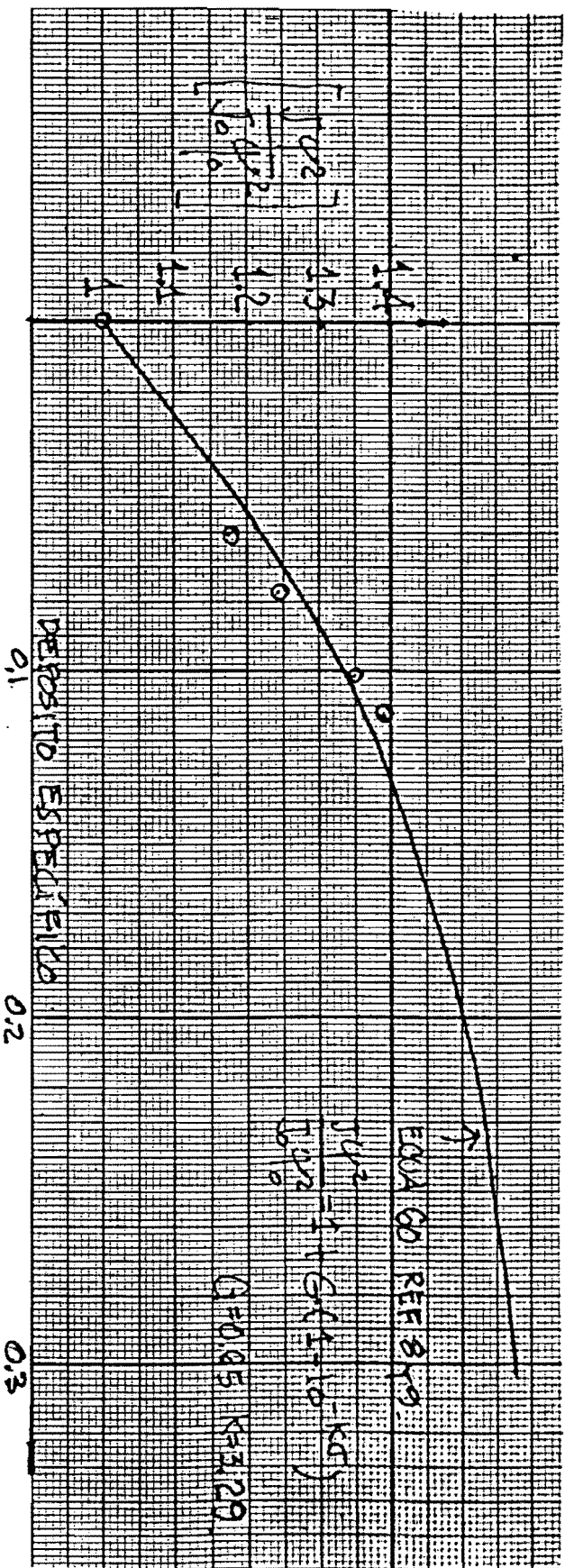


FIG. № 15



CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE FILTRACIÓN A Y B COLUMN. N° 2 (LECHO SIMPLE)

A continuación se presentan los pasos realizados para hacer la determinación de los parámetros A y B de las expresiones definidas por DEB.

Las expresiones para determinar A y B son:

$$\underline{\lambda} = B \left(\frac{X}{P_0 - \sigma} \right)^A \dots \dots \dots \text{ECUAC N° 20}$$

(ECUAC. N° 50 REF. N° 8)

o en forma logarítmica:

$$\log \underline{\lambda} = \log B + A \log \left(\frac{X}{P_0 - \sigma} \right) \dots \dots \dots \text{ECUAC N° 35}$$

(N° 58 REF. N° 8)

También se usan las expresiones para:

n = número promedio de puntos de contacto de cada grano.

$$n = \frac{6 N_{P_1} + 12 N_{P_2}}{N_p} \approx \frac{15.7714 - 26.5109 P_0}{(1 - P_0)} \dots \dots \dots \text{ECUAC 22}$$

$\frac{\Delta d}{d_0}$ = relación de crecimiento del tamaño del grano por el depósito. * ECUAC. N° 27 y N° 28 de la ref. N° 8.

$$\frac{\Delta d}{d_0} = \left(\frac{12}{n\psi_0 - 24} \right) - \sqrt{\frac{144}{(n\psi_0 - 24)^2} - \frac{24\sigma}{(n\psi_0 - 24)^3 (1 - P_0)}} \dots \dots \dots \text{ECUAC 23}$$

(ECUAC N° 43 REF N° 8)

$$X = 1 + \left(2 - \frac{n}{2}\right) \frac{\Delta d}{d_0} + \left(1 - \frac{n}{2}\right) \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 \dots \text{ECUAC. N}^\circ 21$$

X = función de n y $\frac{\Delta d}{d_0}$

(ecuac. n° 32 ref N° 8)

\bar{X} = función de \bar{x} , P_0 y σ .

La tabla N° 8 da la secuencia de cálculos para determinar al coeficiente adimensional del filtro $\bar{\lambda}$ y \bar{X} ; valores estos que mediante el método de mínimos cuadrados aportan los valores de los coeficientes A y B indicados en la ecuación N° 20

TABLA N° 8.

CÁLCULO DE $\bar{\lambda}$ y \bar{X}

cálculos hechos con los datos de la cámara N° 1

σ_i	\underline{C}^*	\underline{x}^{**}	$\bar{\lambda}^{***}$	$\frac{\Delta d}{d_0}$	X	$\frac{X}{(P_0 - \sigma)} = \bar{X}$
0.02	0.925	0.15	2.89	0.0108	0.9707	2.74
0.03	0.98	0.04	3.63	0.0164	0.9553	2.7729
0.04	0.78	0.14	3.63	0.0221	0.9393	2.808
0.075	0.37	0.10	5.699	0.0428	0.8789	2.9348
0.08	0.225	0.19	18.105			

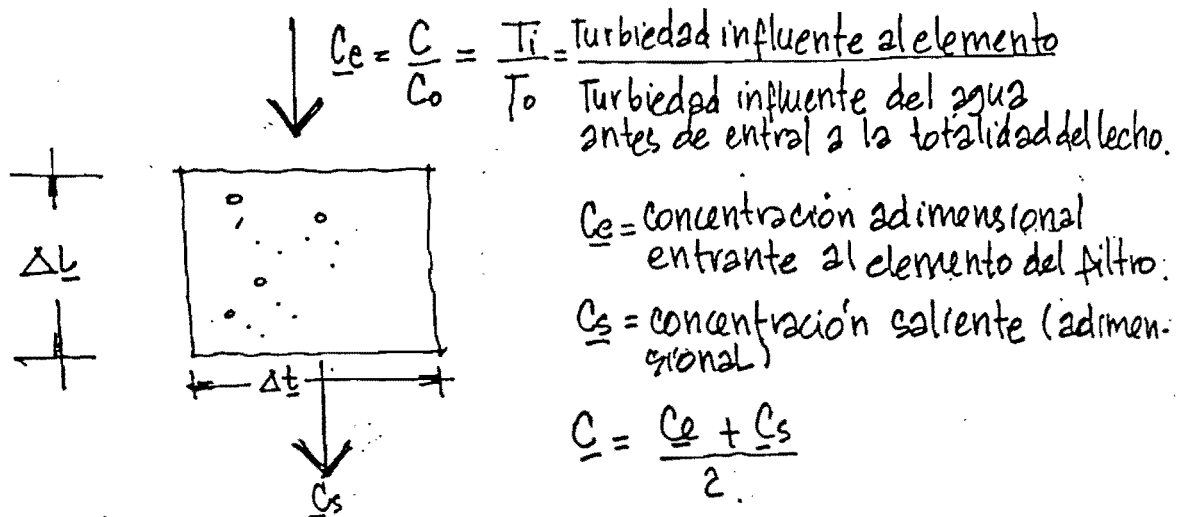
* \underline{C} = relación, C/C_0 , de la suspensión entrante al elemento del filtro, durante el intervalo adimensional de tiempo Δt , entre la suspensión inicial, C_0 .

σ_i = depósito específico, leído de la gráfica de σ vs pérdida de carga en el punto e instante de tiempo de interés.

** $\underline{x} = 1 - \underline{C}$ (para el caso en que $C_0 = \text{constante}$).

*** $\bar{\lambda} = -\frac{1}{\underline{C}} \left[\frac{1}{(P_0 - \sigma_i)} \frac{\partial \underline{C}}{\partial L} + \frac{\partial \underline{C}}{\partial t} \right] \dots \text{ECUAC. N}^\circ 17$
[ECUAC N° 56 REF 8]

para el cálculo de λ se hace indispensable idealizar que el punto de interés define un elemento geométrico de dimensiones $\Delta L \times \Delta t$; o sea un rectángulo de profundidad y tiempo. (ver FIG N° 16).
 FIG N° 16



$\Delta L = \frac{\Delta l}{L}$ = separación entre dos puntos de muestreo.

Para el caso de la columna N° 2

$$\Delta L = \frac{13 \text{ cms}}{110 \text{ cms}} = \frac{\text{separación entre piezómetros (o puntos de muestreo)}}{\text{profundidad del lecho.}}$$

$$\Delta t = \frac{v(\Delta t)}{L} = \frac{[(8.4 \text{ cm/min.})(60 \text{ min})]}{110 \text{ cms}} = 4.58$$

Otros datos adicionales:

P_0 = porosidad del lecho limpio = 0.3745

$\psi_0 = 6.69$

$$n = 9.3413 = \frac{15.7714 - 26.5109(0.3745)}{(1 - 0.3745)}$$

aplicando el método de mínimos cuadrados al conjunto de valores

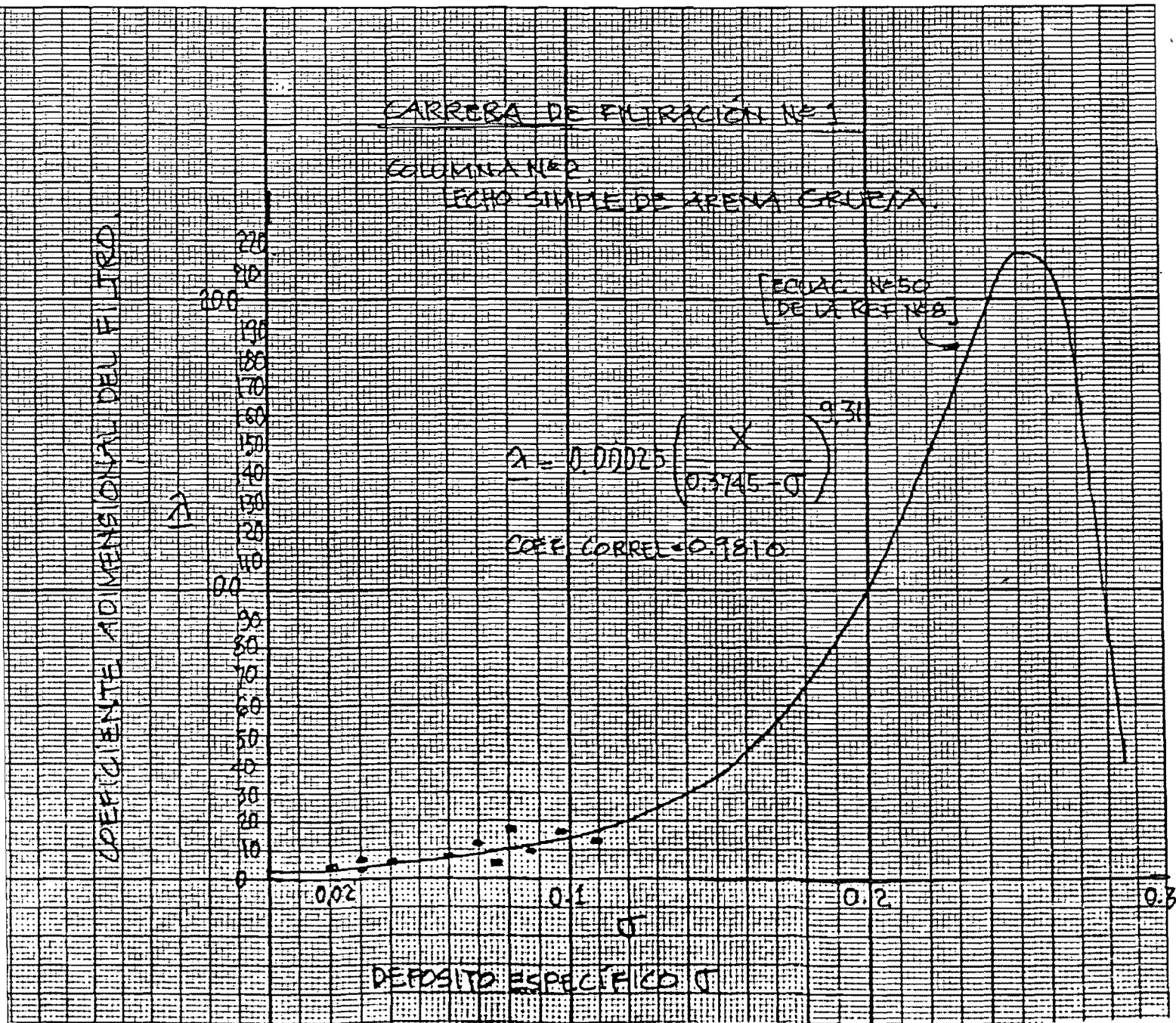
$$\log \lambda = Y \quad \text{y} \quad \log \left(\frac{X}{P_0 - \sigma} \right) = X$$

se determinó $A = 9.311$
 $B = 0.00025$ } con un coef. correlación = 0.9810.

$$\Rightarrow \lambda = 0.00025 \left(\frac{X}{0.3745 - \sigma} \right)^{9.311}$$

VER SU REPRESENTACIÓN EN LA FIG. Nº.17 EN LA HOJA SIGUIENTE

FIG. 18.



Con los parámetros hasta ahora calculados, ya podemos aplicar el programa de computadora (ver anexo N° 1) y obtener valores teóricos para concentración y depósito específico, así como para pérdidas de carga.

Datos para la corrida del programa de las hojas siguientes:

$$P = 0.3745$$

$$A = 9.311$$

$$B = 0.00025$$

$$G = 0.65$$

$$K = 3.29$$

$$F = 9050.$$

DATA N° 30

$$d_l = 0.10$$

$$d_t = 4.58$$

$$n = 9.3413$$

$$O = 4 = 6.69$$

NTF = Número de interv. de tiempo = 3

$$n_{lf} = 10.$$

DATA N° 50.

T(0,0) = 1
 T(1,0) = 1
 T(2,0) = 1
 T(3,0) = 1
 T(4,0) = 1
 T(5,0) = 1
 T(6,0) = 1
 T(7,0) = 1
 T(8,0) = 1
 T(9,0) = 1
 T(10,0) = 1
 T(11,0) = 1
 T(12,0) = 1
 T(13,0) = 1
 T(14,0) = 1
 T(15,0) = 1
 T(16,0) = 1
 T(17,0) = 1
 T(18,0) = 1
 T(19,0) = 1
 T(20,0) = 1

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
 EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 1,1

0.0	0.0	1
0.0	0.05	1
0.0	0.1	1

T(2,2) = 9.4277905

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 3,1

0.0	0.0	1
0.05	0.005	1
0.5	0.305	1

T(4,2) = 10.3000000

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 5,1

0.5	0.75	1
0.4	0.7	1
0.0	0.05	1

T(6,2) = 26.272136

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 7,1

0.3	0.05	1
0.2	0.0	1
0.1	0.05	1

T(8,2) = 37.000076

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 9,1

0.1	0.55	1
.05	0.002	0.004
.02	0.404	0.006

T(10,2) = 47.102492

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 1,3

1	1	1
1	0.938	0.910
1	0.912	0.824

$h(2,4) = 15.311425$

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 3,3

1	0.912	0.824
1	0.872	0.745
1	0.833	0.687

$h(4,4) = 27.184509$

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 5,3

1	0.833	0.687
1	0.793	0.597
1	0.753	0.526

$h(6,4) = 38.047293$

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 7,3

1	0.753	0.526
1	0.731	0.453
1	0.7	0.4

$h(8,4) = 48.90151$

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 9,3

1	0.7	0.4
0.984	0.672	0.38
0.958	0.643	0.319

$h(10,4) = 54.387028$

VALORES DE CONCENTRACION O TURBI
EDAD ADIMENSIONAL

CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE PÉRDIDA DE CARGA
K Y G COLUMNA N°1 (LECHO DOBLE).

LECHO DE ANTRACITA.

Datos: (* pertenecientes a la carrera N°4)

$$P_0 = 0.5668$$

$$* v = 0.25 \text{ cm/s}$$

$$J_0 = 5$$

$$* \nu = 1.0105 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \text{ (a } 20^\circ\text{C)}$$

$$L = 45 \text{ cms}$$

$$d_0 = 1 \text{ mm.}$$

$$\gamma_0 = 8.7645$$

$$* H_0 = 4.5 \text{ cms}$$

TABLA N° 9 PRESENTA:

EL CÁLCULO DEL DEPÓSITO ESPECÍFICO
UTILIZANDO LOS DATOS DE PÉRDIDA DE CARGA

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
H cms	$h = H/L$	h/h_0	$\frac{J_0 \gamma_0^2 \nu v}{g} \left[\frac{1}{d_0} \right]^2$	$\frac{[1-P]^2}{P^3}$	P	$\sigma = P_0 - P$
4.5	0.10	1	0.0988	1.0305	0.5668	0.00
8.5	0.19	1.89	0.0988	1.922	0.504	0.063
11	0.24	2.44	0.0988	2.427	0.481	0.0858
13	0.29	2.89	0.0988	2.933	0.462	0.1048
15.5	0.34	3.44	0.0988	3.439	0.4465	0.1203
16	0.36	3.56	0.0988	3.641	0.441	0.126
18	0.399	3.99	0.0988	4.038	0.431	0.136
19	0.422	4.22	0.0988	4.27	0.4257	0.1411
20	0.444	4.44	0.0988	4.49	0.4209	0.146
22	0.489	4.89	0.0988	4.95	0.412	0.155

Cálculo de la relación:
$$\frac{Jq^2}{J_0q^2} = \frac{h}{h_0} \left[\frac{P_0 - \sigma}{P_0} \right]^3$$

TABLA N° 10 cálculo del término Jq/J_0q^2

$\sigma \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	$\frac{Jq^2}{J_0q^2} = \frac{h}{h_0} \left[\frac{P_0 - \sigma}{P_0} \right]^3$
0.000	1.000
0.063	1.327
0.0858	1.4911
0.1048	1.565
0.1203	1.6816
0.126	1.7403
0.136	1.7519
0.1411	1.7878
0.146	1.8168
0.155	1.8753

Aplicando el método de mínimos cuadrados, y realizando tanteos para el valor de G, se obtuvo el valor de los parámetros K y G del lecho de antracita:

$$K = 2.75$$

$$G = 1.4$$

Y el coeficiente de correlación fue de 0.9859.

FIG Nº 10

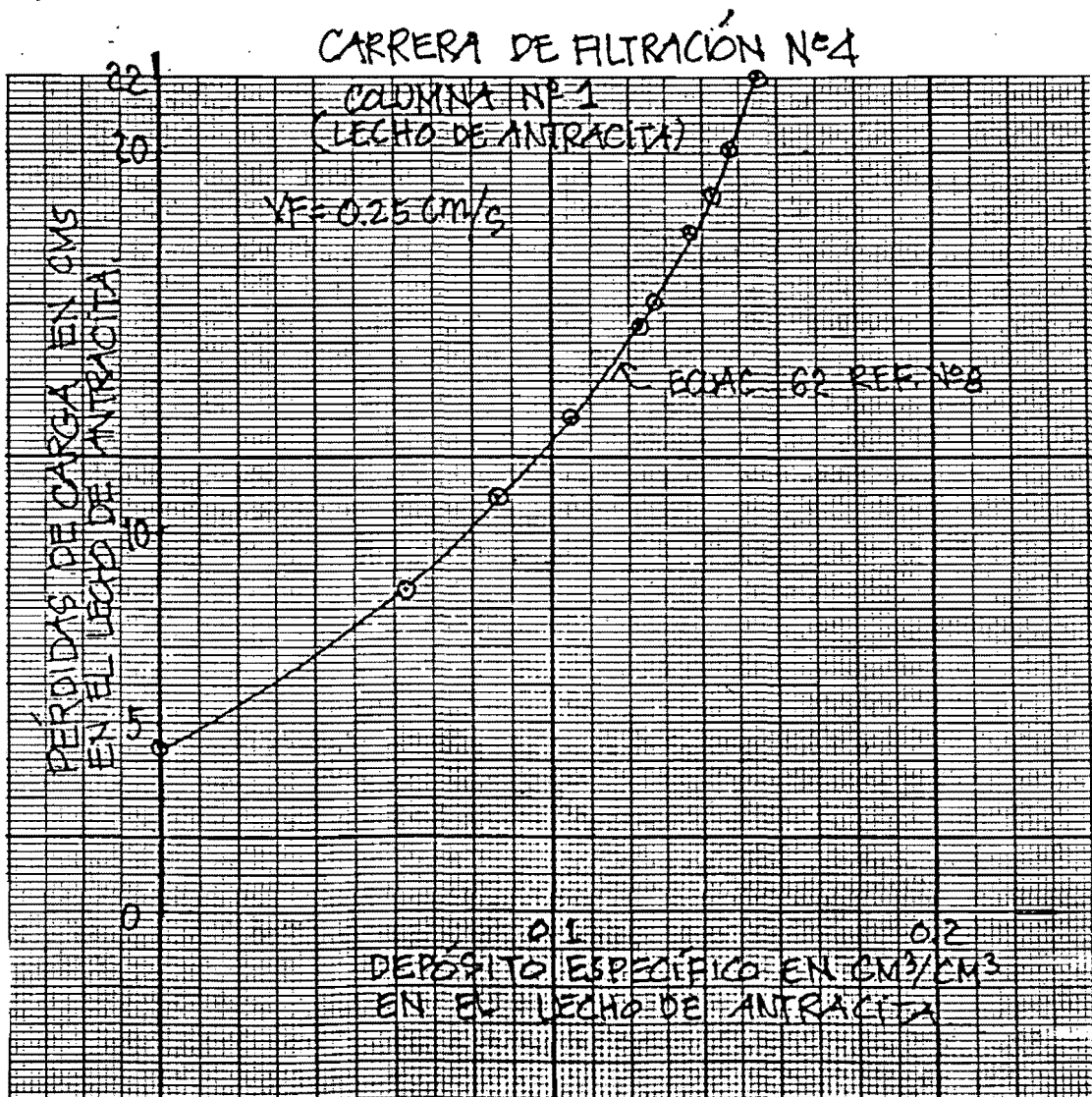
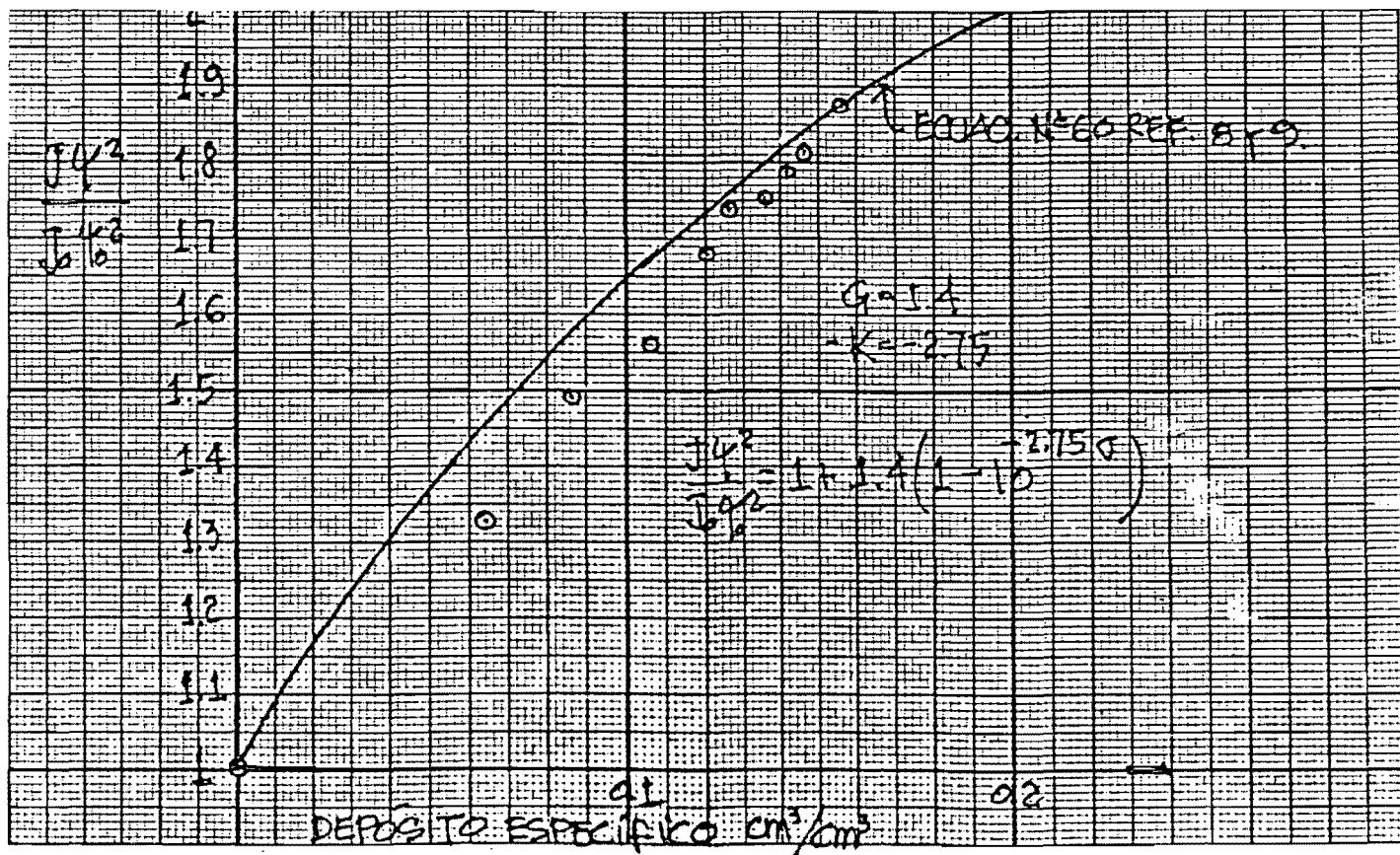


FIG N° 20

RELACIÓN ENTRE EL DEPÓSITO ESPECÍFICO σ
 Y EL TÉRMINO DE CAMBIO DE FORMA DEL
 GRANO, COLUMNAS N° 1, CARRERA N° 4.



En forma similar a los cálculos hasta aquí presentados se ejecutaron el resto de los cálculos para determinar los parámetros presentados en la TABLA N°11.

TABLA N°11
VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CARGA Y FILTRACIÓN.

TIPO DE MODELO	VELOCIDAD DE FILTRACIÓN PROMEDIO	TAMAÑO PROMEDIO GEOMÉTRICO (d ₀)	PARÁMETROS:			
			A	B	G	K
SIMPLE	0.14 cm/s	1.15 mm	9.311	0.00028	0.65	3.29
DOBLE ANTRACITA	0.25 cm/s	1 mm	2.68	0.89	1.4	2.75
ARENA	0.25 cm/s	0.59 mm	4.18	1.27	1.8	5.4

[PARTE N°6]

EVALUACIÓN DE LOS DATOS.

El comportamiento de los filtros bajo una carga de turbiedad influente de 24 UNT y sin ninguna ayuda química se ve representado en las gráficas N°21 y 22. Se observa un rápido deterioro de ambos tipos de filtros pilotos; en menos de 120 minutos de carrera de filtración la eficiencia de remoción de turbiedad se redujo casi en un 20%, reportándose a la salida de los filtros turbiedades superiores a las 4 UNT.

Similarmente los dos modelos con una dosis baja de sulfato de aluminio y polielectrolito catiónico mejoraron su capacidad de retención (ver las figuras N°23 y 24), soportando por un tiempo mayor la turbiedad influente el filtro diseñado bajo la práctica europea. - Sin embargo en el filtro de lecho doble se identificó una zona de alta eficiencia de remoción en los inicios del lecho de arena.

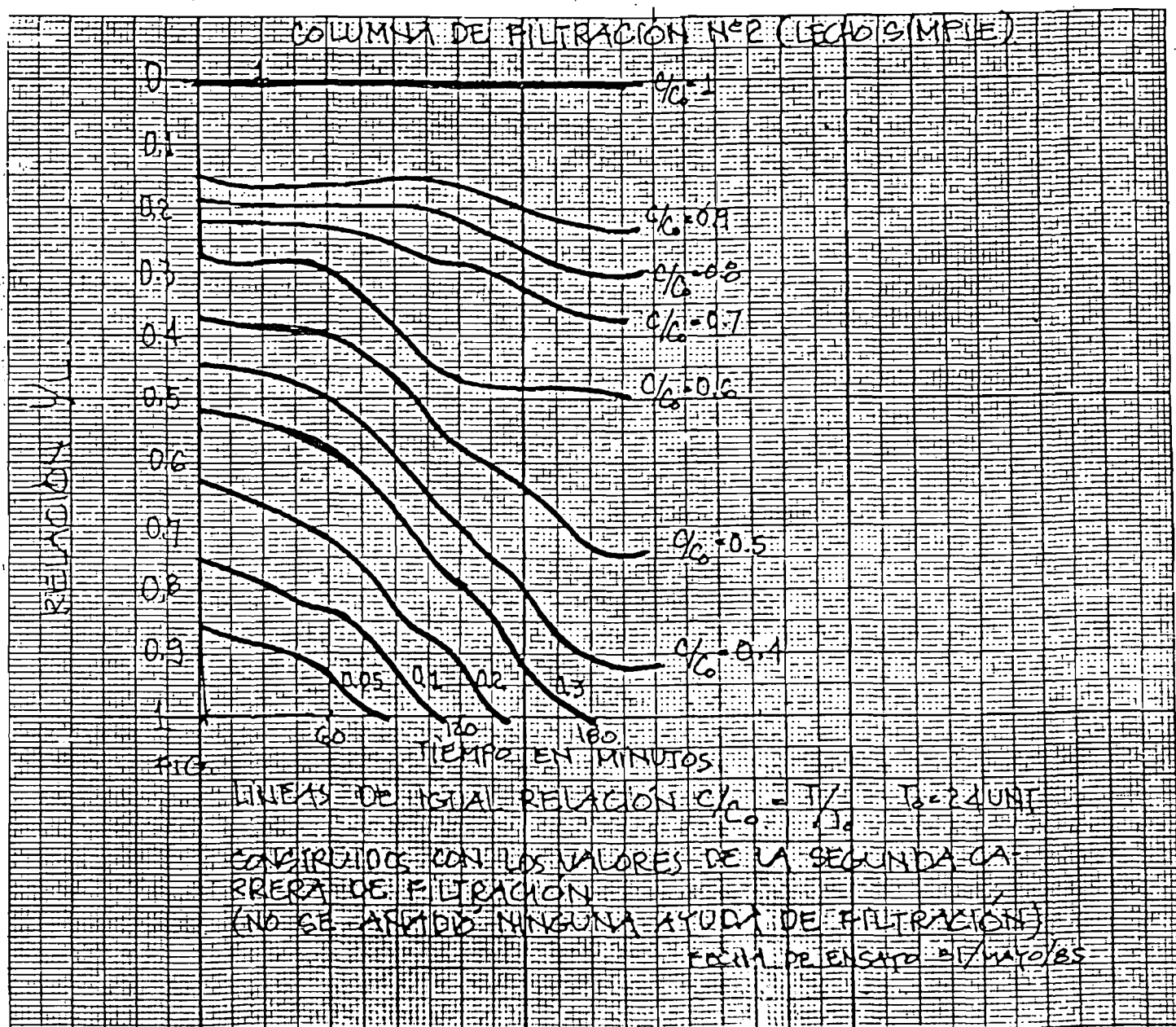
El comportamiento en cuanto a pérdidas de carga es linealmente ascendente, en ambos modelos, para profundidades relativas del 20%; advirtiéndose simultáneamente declinación en la tasa de filtración influente. (ver FIG. 7, 8 N°9, N°10 y N°12); Para una idéntica tasa de filtración se producen pérdidas de carga mayores en la columna de lecho simple, a tal grado que una tasa de 3.5 Lps/m² sobre dicho lecho agota en un tiempo menor a los 160 minutos la carga hidráulica excedente en el modelo (60 cms).

Es una lástima que no se pudiesen hacer mediciones directas del depósito específico, pues una determina-

La figura N°22 muestra las curvas de igual valor de C/C_0 ; observe el deterioro rápido del medio filtrante (20 mm. \approx)

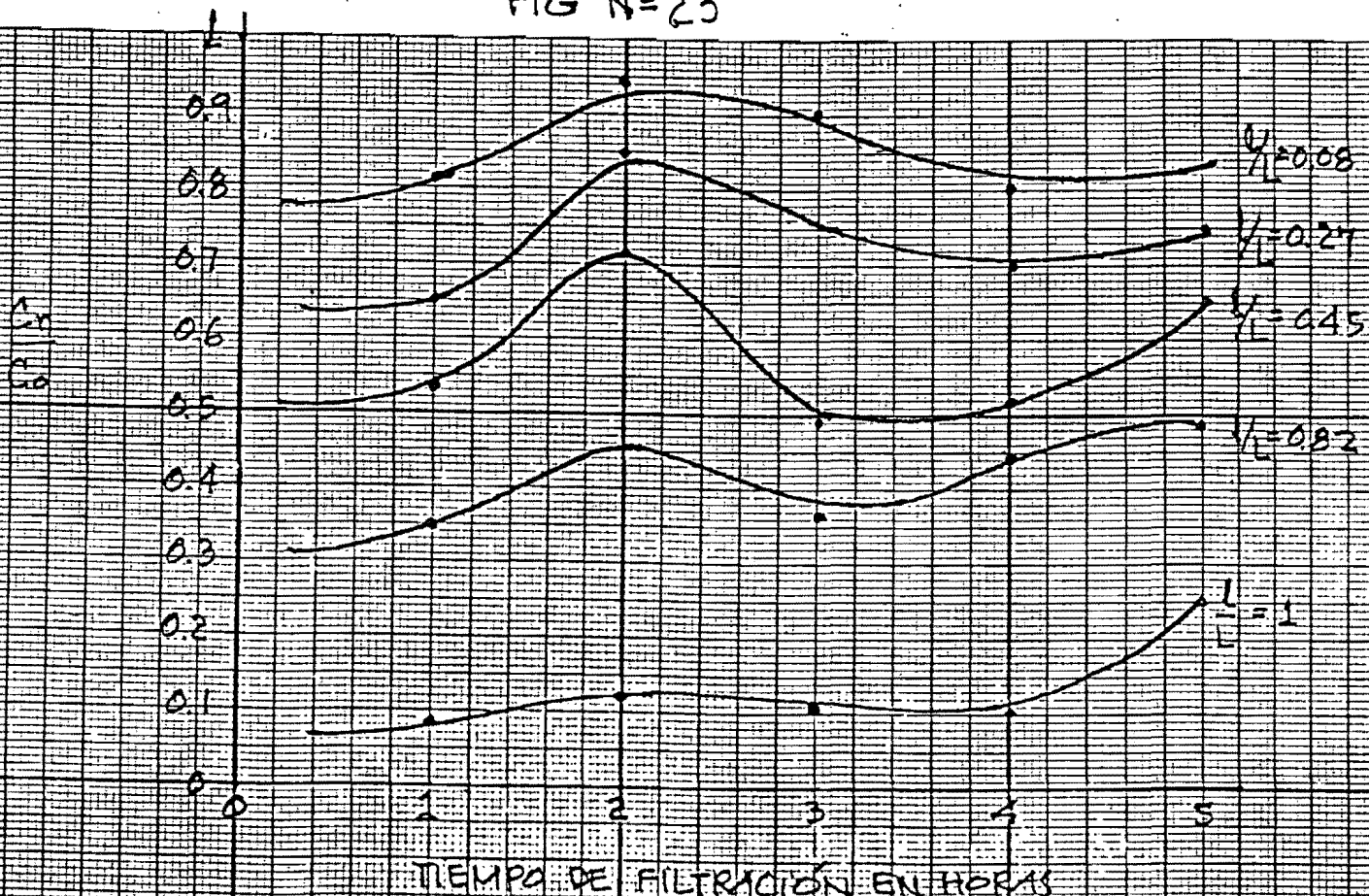
En esta carrera no se usó ni sulfato de aluminio ni polielectrolito; así mismo la tasa de filtración fue de 1.37 LPS/M²

FIG N°22



La figura N°23 muestra las curvas de igual valor de C/C_0 en el interior del lecho doble, columna N°1, al agregar ayudas de filtración.

FIG N°23



C_n = turbiedad en el punto de muestreo "n", correspondiente a la profundidad relativa l/L , indicada
 C_0 = turbiedad inicial inuyente; en este caso $C_0 = 25$ UNT (carre-
 ra de filtración N°4, lecho doble).

CARRERA N° 1

TIEMPO ADIMENSIONAL DE FILTRACION

4.08 9.6 13.74

RAZON DE PROFUNDIDAD Y/L

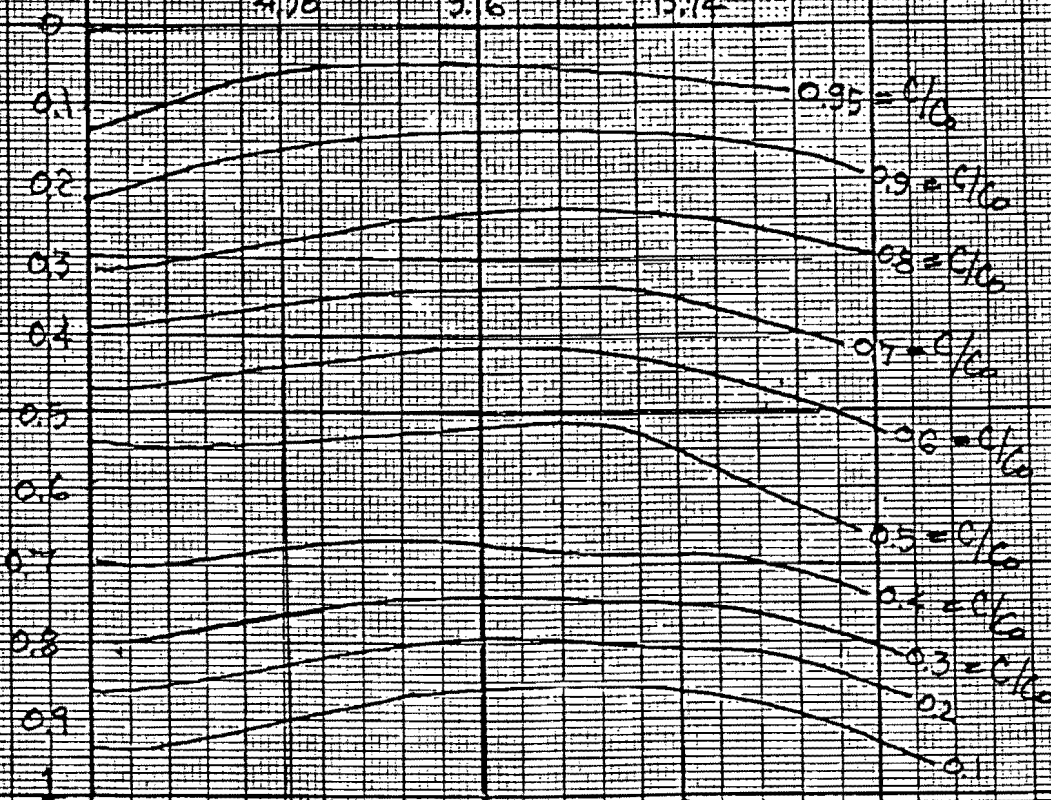


FIG N° 24

ción de laboratorio hubiese significado un mejor punto de apoyo para evaluar el comportamiento de dichos modelos; apesar de todo el modelo matemático empleado da la idea de que para que ocurra el agotamiento de la zona de depósito de los lechos se requieren cargas el doble de superiores a las disponibles en los modelos (ver figuras N° 14 y 19).

En vista de que existían fugas en la base del filtro de lecho simple no deseo emitir ningún juicio sobre la cantidad de producción de agua de cada modelo; sin embargo deseo señalar que el agua efuyente de los filtros no fué en ningún momento acelerada por zonas de presión negativa en los lechos de cada uno de los modelos, gracias a la reforma realizada en el sistema de galida de las unidades antes de iniciar las pruebas de filtración.

Los parámetros de filtración son exclusivos de las condiciones experimentales ensayadas, más pueden ser utilizados sin temor para tener una orientación de la duración de futuras pruebas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

[C-1] A pesar de que inicialmente fueron definidas las variables y condiciones de las pruebas realizadas, éstas se vieron limitadas especialmente por las características físicas de los modelos y no por su importancia en el proceso de filtración.

Algunas de las limitantes detectadas a través del presente trabajo son:

- (A) La carga hidráulica disponible en ambos modelos resulta insuficiente cuando se desean lograr carreras experimentales de duración suficiente para hacer una comparación fundamentada en un buen número de datos de laboratorio.
- (B) También la poca carga hidráulica limita el que puedan ser ensayadas tasas o velocidades de filtración superiores a 4 lps/m^2 ya que las pérdidas iniciales de filtración consumen rápidamente parte de la misma.
- (C) Las diferencias de las columnas en cuanto a: secciones transversales, falsos fondos y cargas hidráulicas disponibles; ocasionan que los filtros no puedan ser ensayados bajo condiciones del todo similares.
- (D) La toma de muestras utilizando jeringas hipodérmicas impide que las mismas puedan ser debidamente extraídas de los medios filtrantes en un tiempo menor de 20 minutos, tiempo éste que unido al utilizado en lectura de datos, turbiedades, genera un periodo de tiempo demasiado largo para realizar un muestreo a intervalos de tiempo inferiores a los de una hora.

El modelo matemático aplicado en el presente trabajo fué un intento más de aproximar algunas de las expresiones teóricas de filtración a casos prácticos de éste proceso.

Las correlaciones logradas entre los datos experimentales y las curvas teóricas calculadas en un computador electrónico es, a criterio personal, aceptable.

La información recopilada en tan pocas pruebas de filtración, en carreras, dan fe de la potencialidad docente y experimental de ambos modelos, así como su versatilidad y flexibilidad para adaptarse a futuros estudios de filtración. Sin embargo en estudios como el aquí realizado es también de importancia determinar el contenido de coagulante residual (ALTT) y evaluar con ello la posible fragmentación de los flocúlos ocasionada por las fuerzas de arrastre.

Es recomendable también minimizar el tiempo de toma de muestras, ya que la velocidad con que se extraen las mismas influye en el número de partículas que se succionan. Por otro lado es indispensable aumentar la carga hidráulica existente sobre los modelos para lograr la utilización de tasas más altas de filtración. Por el comportamiento hasta ahora observado se sugieren ampliaciones en la carga hidráulica disponible total del orden de 150 cms.

La filtración por contacto para ésta agua problema de 24 UNT dió buenos resultados, especialmente en el filtro de lecho simple donde se llegaron a observar turbiedades efluentes inferiores a 0.6 UNT. Al parecer la dosis de coagulante y ayuda de filtración que se aplicó resultó adecuada al problema de calidad de agua presentado, al menos para el filtro de práctica europea.

Para el lecho de práctica americana es especialmente recomendable ensayar otra combinación que pueda producir un microfloculo de volumen adecuado, más compacto y que se fije a las partículas del lecho antes que pueda crecer por hidratación.

De los ensayos hasta aquí realizados podemos concluir que para las condiciones analizadas los únicos aspectos que favorecen al filtro diseñado con la práctica americana, sobre el diseñado con recomendaciones europeas, es las menores pérdidas de carga y el ser de una profundidad total más baja; factores éstos que pueden ser de importancia al momento de adoptar una decisión sobre qué práctica utilizar. Sin embargo el filtro con características europeas tiene a su favor el que su lecho filtrante fue construido con materiales locales. aspecto también importante al tomar una decisión final especialmente en países de menores posibilidades económicas que los países denominados industrializados.

ANEXO Nº 1

PROGRAMA:

SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE FILTRACION.

La utilización del programa, listado en esta parte, proporciona valores teóricos de las relaciones adimensionales de concentración y depósito específico, a cualquier tiempo y profundidad.

En el presente apartado se presenta una comida del programa, así como el orden de las visualizaciones que provocará su ejecución.

Este programa supone que las condiciones de frontera, de las ecuaciones diferenciales de filtración, son conocidas inicialmente, así como los parámetros del lecho y de la suspensión; razón por la cual se propone su utilización en el presente trabajo.

La codificación fue basada sobre el diagrama de flujo propuesto por Arun K. Deb^[9] haciendo únicamente modificaciones provocadas por la capacidad de la computadora utilizada (ZX SPECTRUM/SINCLAIR 2068 con 48 K de Ram).

PROGRAMA DES

EL PRESENTE PROGRAMA FUE DESARROLLADO CON LA INTENCION DE ANALIZAR LOS CAMBIOS EN LA PERMEABILIDAD DE UN LECHO DE FILTRACION DE ARENA EN EL TIEMPO DE FILTRACION.

ESTA BASADO EN LA SOLUCION ANALITICA DE LA ECUACION DE DARRY-WEISBERG PARTICULARES DE LA ECUACION DE DARRY-WEISBERG ORIGINAL DE LA D.S.C.M.

LOS ARTICULOS SON:
* THEORY OF SAND FILTRATION // J.P.S.C.M. ... JUN. 1966
** NUMERICAL SOLUTION OF FILTRATION EQUATION // J.P.S.C.M. ... ABRIL 1970

AHORA LE EXPLICAREMOS LA FORMA DE DAR ENTRADA A LOS DATOS.....

En el DATA numero 30 debere agregar en el orden en que aparecen los siguientes datos:
p = porosidad del lecho limpio

a, b = parametros de filtracion
a, k = parametros de perd. de carga
a = const. adimensional

en el data 50 introducir:
dl = intervalo adimensional de longitud L/L
dt = interv. adim. de tiempo
n = numero promedio de contactos
a = const. adimensional

en el data 50 introducir:
dl = intervalo adimensional de longitud L/L
dt = interv. adim. de tiempo
n = numero promedio de contactos
o = factor de forma del grano limpio
nti = numero de interv. de tiempo que desea
nli = numero de interv. de long.

```

10 PRINT "PROGRAMA DEB
11 PRINT " EL PRESENTE PROGRAMA
MA FUE CREADO CON LA INTENCION DE
SIMULAR LOS CAMBIOS EN EL ESTADO
SITO ESPECIFICO DE UN LECHO DE FILTRACION
DURANTE EL TIEMPO DE FILTRACION.
12 PRINT " ESTE SACADO EN LA RESOLUCION
NUMERICA PROPUESTA POR D. DEB EN SUS
ARTICULOS ESCRITOS PARA LA JOURNAL DE LA
A.S.C.E.
13 PRINT " LOS ARTICULOS SON
# THEORY OF SAND FILTRATION // J.A.S.C.E.
...JUN. 1969
# NUMERICAL SOLUTION OF FILTRATION
EQUATION // J.A.S.C.E.
...ABRIL 1970
PAUSE 120:CLS
14 PRINT " AHORA LE EXPLICAREMOS LA
FORMA DE DAR ENTRADA A LOS DATOS.
15 PRINT " EN EL DATA NUMERO 3 @
DEBERA ALMACENAR EN EL ORDEN EN QUE
APARECEN LOS SIGUIENTES DATOS:
p= porosidad del lecho limpio
a,b=parametros de filtracion
c,d,k=parametros de pared de carga
f=const. edimension
16 PRINT " EN EL DATA
50 INTRODUCIR: PRINT " PRINT "
dt= intervalo edimensional de longitud
L/L: PRINT " dt= interv. edim.
de tiempo: PRINT " na= numero
promedio de contactos: PRINT "
fo= factor de forma del grano limpio:
PRINT " nti= numero de interv.
de tiempo que desea: PRINT "
nli= numero de interv. de long.: PRINT
60 READ p,a,b,c,d,k,f
70 DATA .40,4,1.75,3,15,5555
80 READ dt,dti,na,nti,nli
90 DATA .02,7.74,7.6500,7.87,1
95 PRINT " PRINT " el resto de
datos le seran pedidos por la computadora
...
100 DIM e(25,25): DIM h(25,25):
DIM c(25,25)
110 DIM v(25,25)
120 PRINT "distribucion inicial
de c(i,0)"
130 FOR i=1 TO nli+1
140 PRINT "c(i,0)=0"
150 INPUT c(i,1)
160 PRINT c(i,1)
170 NEXT i

```

```

El resto de datos le serán pasados por la computadora...
distribucion inicial de c(i,0)
c(1,0)=1
c(2,0)=0.0001
c(3,0)=0.0001
c(4,0)=0.0001
c(5,0)=0.0001
c(6,0)=0.0001
c(7,0)=0.0001
c(8,0)=0.0001
c(9,0)=0.0001
c(10,0)=0.0001
c(11,0)=0.0001
c(12,0)=0.0001
c(13,0)=0.0001
c(14,0)=0.0001
c(15,0)=0
c(16,0)=0

```

```

e(1,0)=0.0001 coef. filt=01.4
e(3,0)=0.015 coef. filt=00.0
e(5,0)=0.008 coef. filt=00.0
e(7,0)=0.004 coef. filt=00.0
e(9,0)=0.002 coef. filt=00.0
e(11,0)=0.001 coef. filt=01.0
e(13,0)=0 coef. filt=01.0
e(15,0)=0 coef. filt=01.0
despues ver los valores de las con-
centraciones listados al o grafic-
ados=0

```

VALORES DE CONCENTRACION O TURBE-
 EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 1.1

1	1	1
0.775	0.745	0.745
0.55	0.485	0.435

VALORES DE CONCENTRACION O TURBE-
 EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 3.1

1	1	1
0.55	0.485	0.435
0.425	0.375	0.305
0.3	0.25	0.205

VALORES DE CONCENTRACION O TURBE-
 EDAD ADIMENSIONAL

valores de la red 5.1

0.3	0.25	0.221
-----	------	-------

```

130 REM distribucion del decisi
to es específico
140 FOR i=1 TO n1/1+1
150 LET e(i,1)=0
160 NEXT i
170 REM
180 FOR i=1 TO n1/1+1
190 PRINT "n1/1=";i";e1=";
200 LET e(i,1)=1
210 PRINT e(i,1)
220 NEXT i
230 REM
240 PPULSE 50: CLS
250 FOR j=1 TO n1/1+1
260 LET c(i,j)=1
270 LET r(i,j)=0
280 NEXT j
290 LET W=(n*0-24)
300 DEF FN d(W,p,e)=(12/W)-50P
((144/(W+2))-(24*e)/(3*W*(1-p)))
310 DEF FN x(n,d)=1+(2-n/2)*d+(
1-n/2)*d*d
320 DEF FN v(b,e,x,p,e)=b*(x/(p
-e)) + e
330 REM
340 FOR j=0 TO n1/1+1 STEP 2
350 FOR i=0 TO n1/1+1 STEP 2
360 LET e(i,j)=e(i,j-2)
370 LET dd=FN d(W,p,e(i,j))
380 LET xx=FN x(n,dd)
390 LET vv=FN v(b,e,xx,p,e(i,j))
400
410 GO SUB 1000
420 IF ABS (e(i,j)-v(i,j)) <=.00
01 THEN GO TO 500
440 LET e(i,j)=v(i,j)
450 GO TO 380
500 LET e(i,j)=v(i,j)
501 LET r=((1/(2*dd)))+(p/(2*dd)
)-(e(i,j)+e(i,j-2))/(4*dd))
502 LET u1=(r*(e(i,j)-e(i,j-2))
)/dd
503 LET u2=(c(i-1,j)+c(i-1,j-2)
-e(i+1,j-2))/(2*dd)
504 LET u3=(c(i-1,j-2)+r(i+1,j-
2)-c(i-1,j))/(2*dd)
505 LET w1=p-(e(i,j)+e(i,j-2))*
r
506 LET c(i+1,j)=(u2+u3*w1-u1
)/r
507 PRINT "....."
PRINT "e("i-1";"j-1";"i";"j")=";INT
1000*e(i,j)/1000;TRN 15;"coef.
r1=";INT (10+45)*10
510 LET c(i,j-2)=(c(i-1,j-2)+c
i+1,j-2))/2
520 LET c(i+1,j-1)=.5*(c(i+1,j)
+c(i+1,j-2))
530 LET c(i,j)=.5*(c(i-1,j)+c(i
+1,j))
540 LET c(i,j-1)=(c(i,j)+c(i-1,j-
2))*5
550 LET c(i-1,j+1)=(c(i-1,j)+c
i-1,j-2))*5

```


ANEXO N° 2

ADAPTACIONES HECHAS AL MODELO.

Las figuras anexadas a continuación dan una idea general de las reformas que se hicieron al modelo antes de iniciar la ejecución de las cámaras de filtración.

Cada figura justifica brevemente por qué se realizó dicha adaptación.

Se agrega en ésta parte un diagrama esquemático del montaje del experimento (ver fig N° 3)

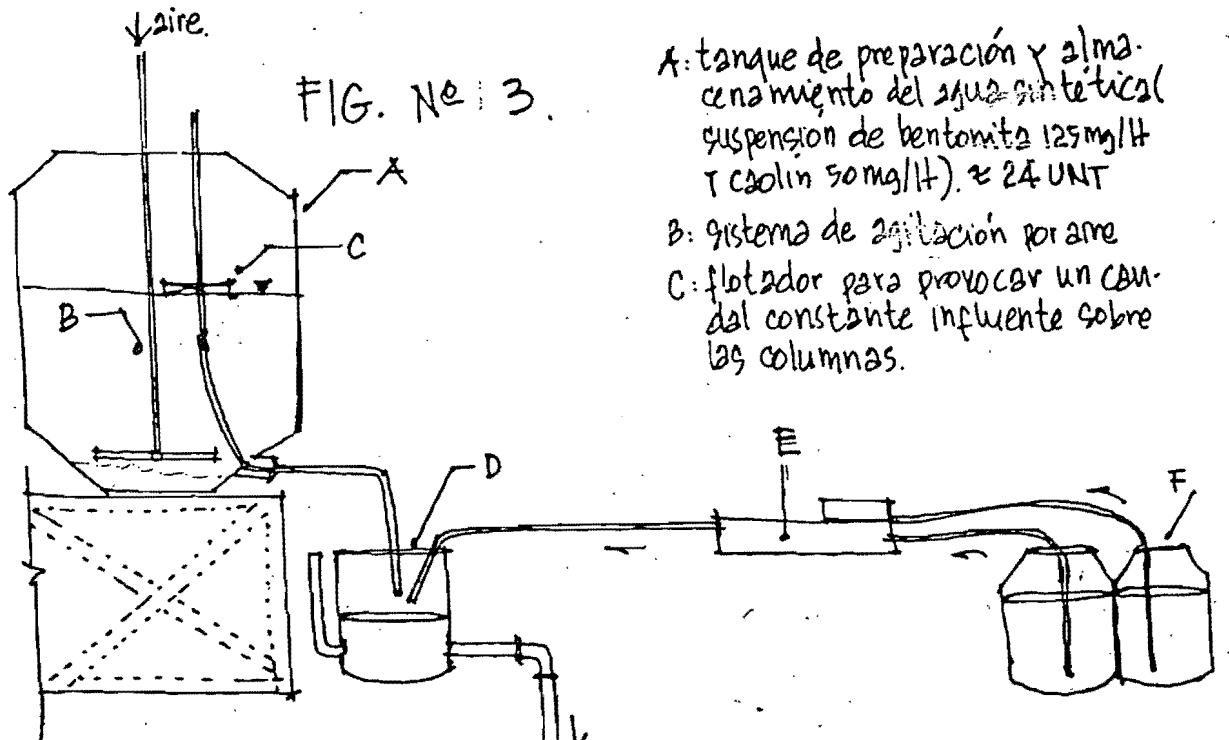
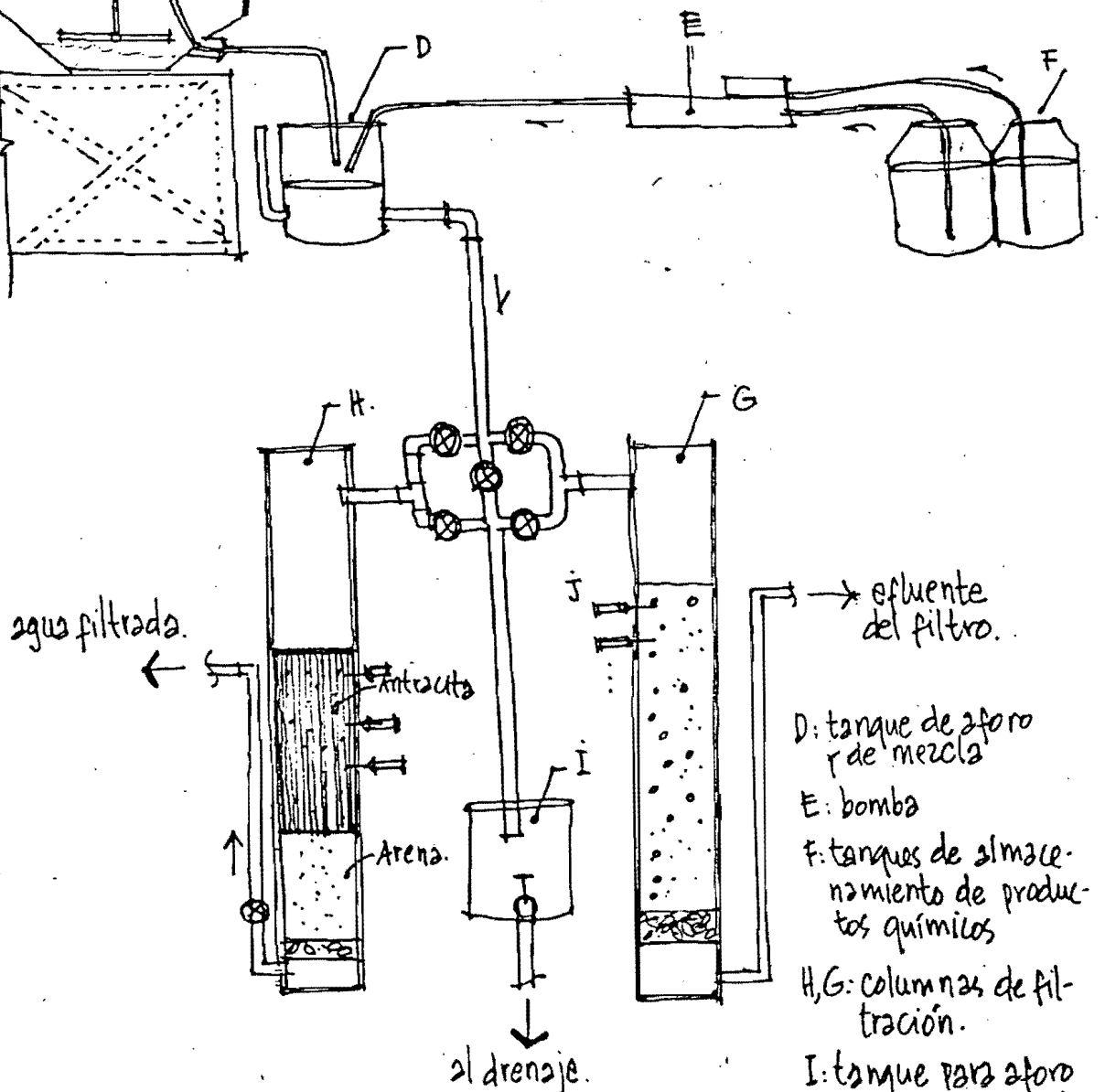


FIG. No. 3.

A: tanque de preparación y almacenamiento del agua sintética (suspension de bentonita 125 mg/lit + caolin 50 mg/lit) \approx 24 UNT
 B: sistema de agitación por aire
 C: flotador para provocar un caudal constante influente sobre las columnas.



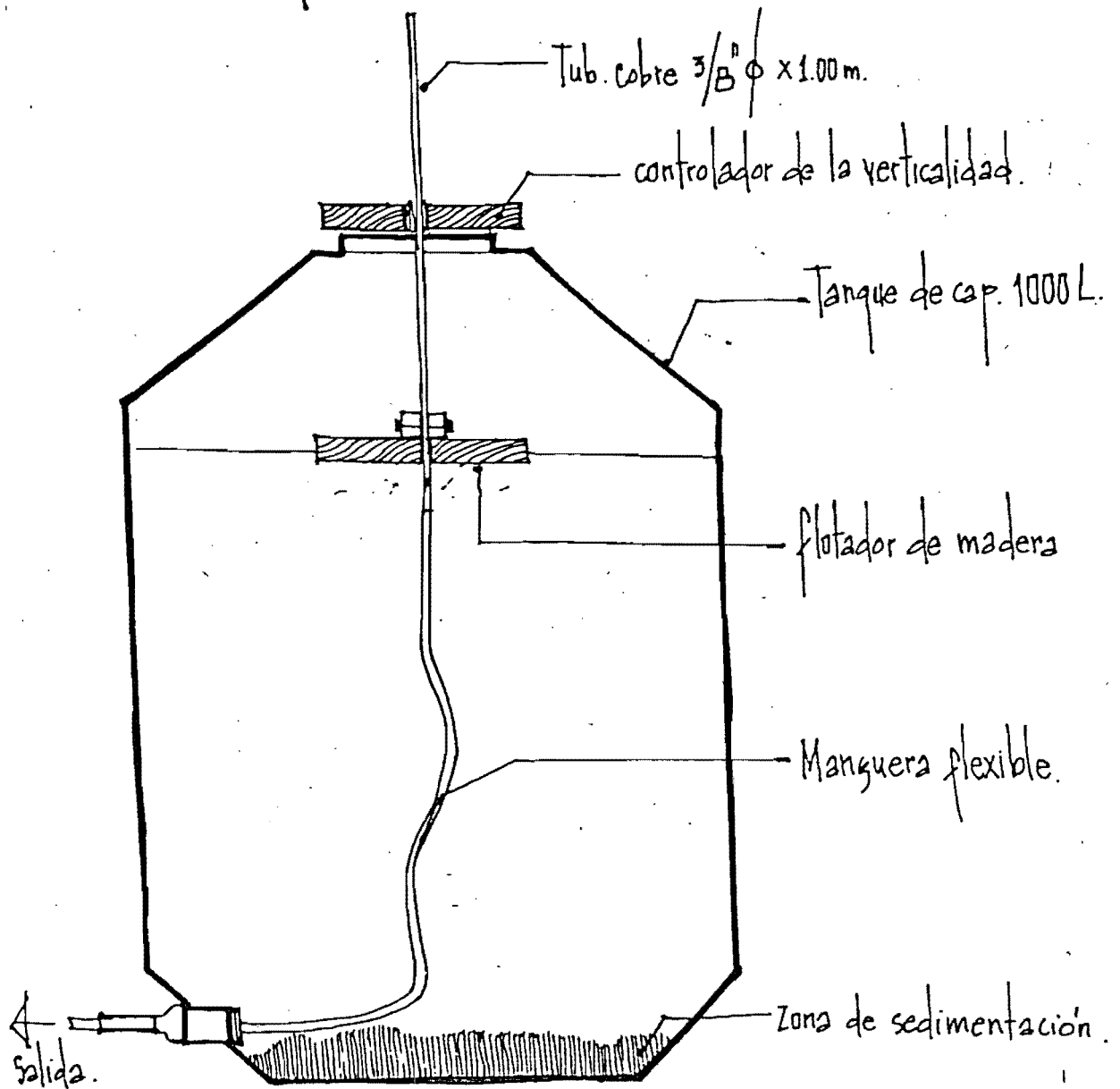
D: tanque de aforo y de mezcla
 E: bomba
 F: tanques de almacenamiento de productos químicos
 H, G: columnas de filtración.
 I: tanque para aforo de agua de lavado.
 J: toms de muestras.

ESQUEMA DEL MONTAJE DEL EXPERIMENTO.

FIG. 3

FIG. N° 25

Adaptación de un sistema de distribución de influentes para las columnas de filtración.- construido para garantizar una tasa constante y un agua de calidad influente ^{o turbiedad} más o menos constante con el tiempo.



Detalles del flotador.

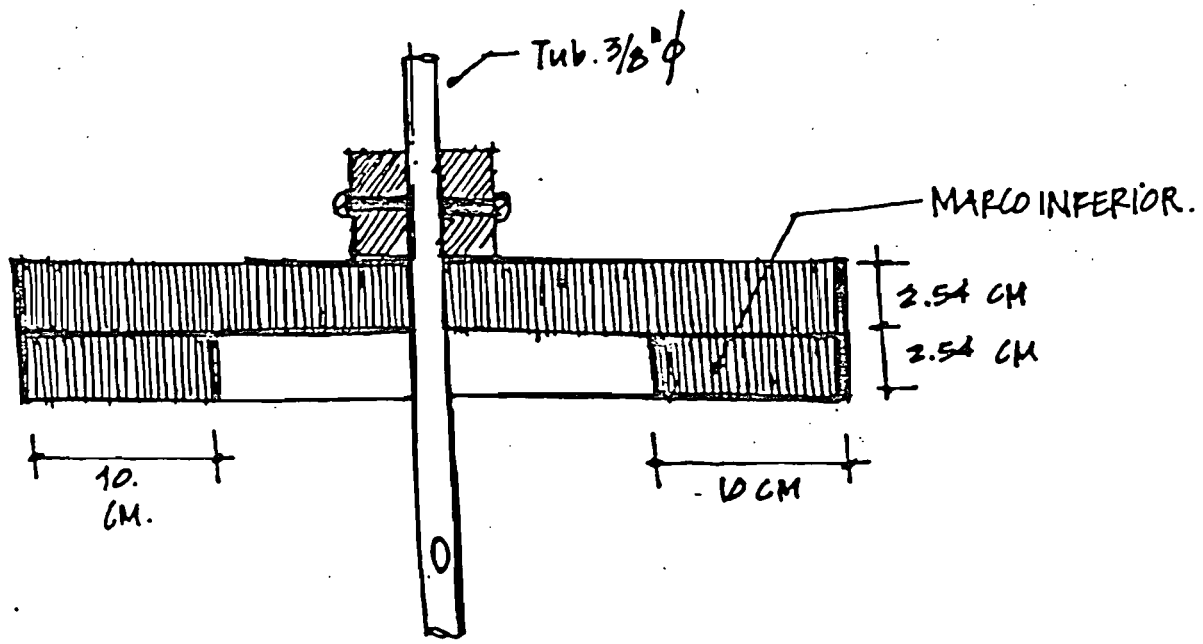
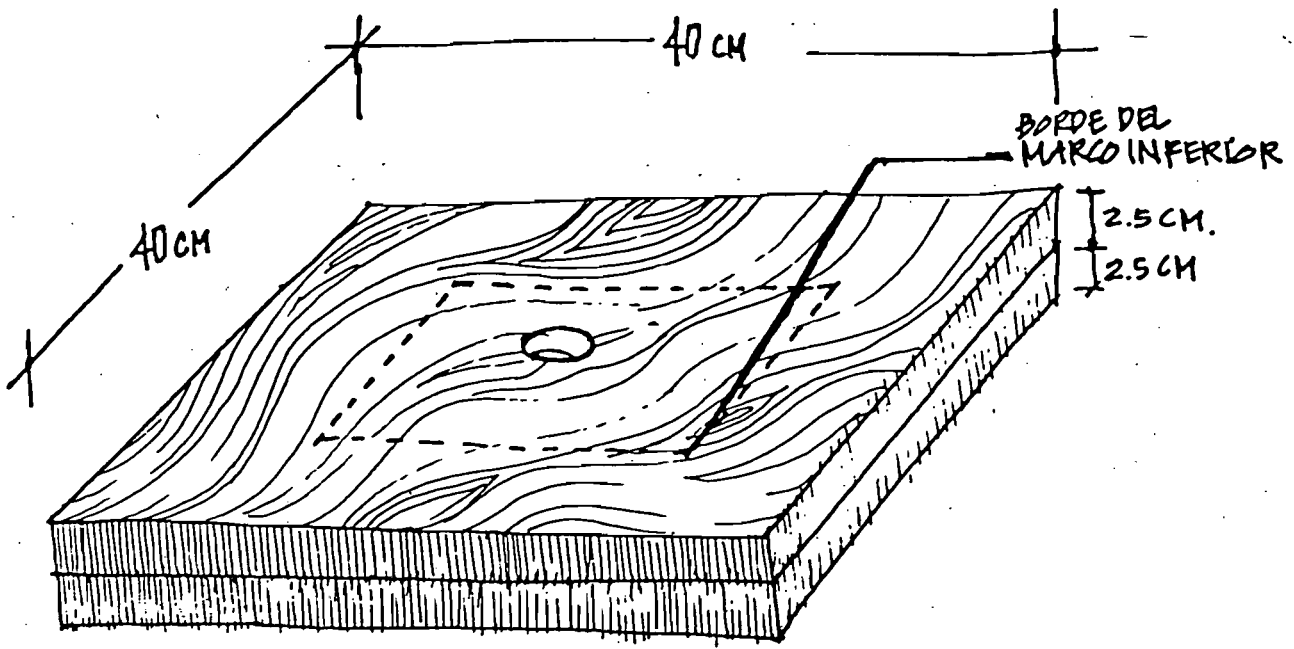


FIG N^o 26.

Detalle del sistema de agitación instalado en el interior de ϕ u de los dos tanques de 1000 l. de capacidad; construido con el objetivo de lograr una agitación más eficiente durante la fabricación del agua sintética.

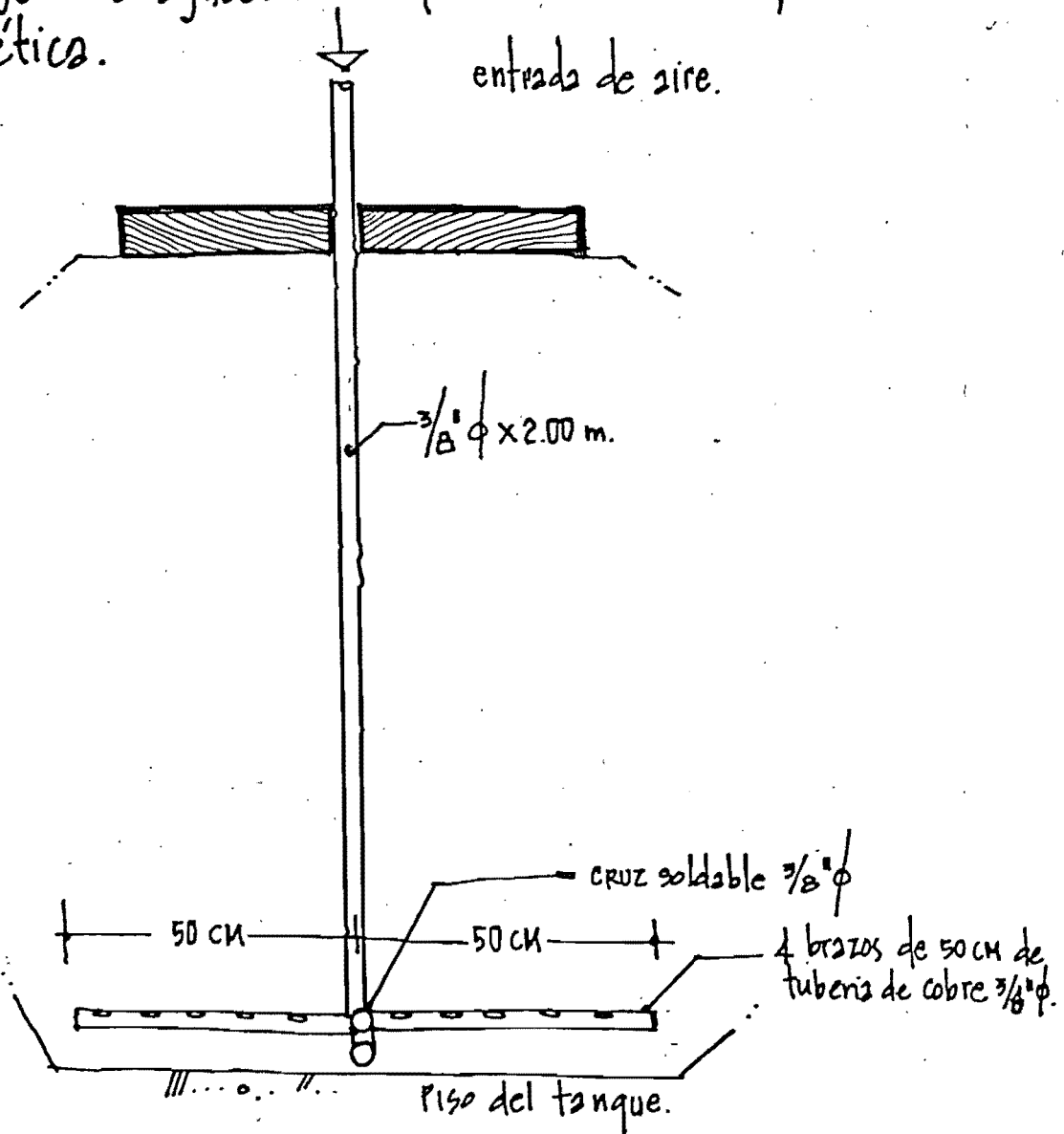


FIG. 27

ANEXO N°3

NOTACIÓN EN ORDEN DE APARICIÓN EN EL TEXTO:

C = concentración de las partículas en la suspensión $L^3.L^{-3}$

σ = Depósito específico, $L^3.L^{-3}$

I = concentración de cantidad de materia microscópica por unidad de área.

Z = profundidad, L .

λ = módulo de impedimento, L^{-1}

S = cantidad de materia microscópica contenida en un cm^3 de arena de lecho.

Y = tiempo de filtración, T

λ_0 = módulo de impedimento inicial, L^{-1}

f_0 = Valor de la porosidad en el instante de depósito de los sólidos.

v = Velocidad de aproximación LT^{-1}

t = tiempo de filtración, T .

h = pérdida de carga, L .

ϕ = variable experimental L .

i = gradiente hidráulico, $L.L^{-1}$

i_0 = gradiente del lecho limpio.

g = aceleración de la gravedad, $L.T^{-2}$

S = factor de forma.

ν = viscosidad cinemática $L^2.T^{-1}$

J = constante de HAZEN

Δd = incremento en el tamaño del grano.
 d = tamaño promedio geométrico.

R_h = Radio hidráulico, ecuación N° 10

d_0 = tamaño del grano al inicio de la filtración. L.

P_0 = porosidad del lecho limpio.

λ' = coeficiente modificado del filtro, definido por DEB.

P_s = porosidad del material depositado en el lecho filtrante

\underline{C} = concentración relativa = c/c_0 .

C_0 = concentración de la suspensión influente $L^3 \cdot L^{-3}$

\underline{l} = profundidad relativa = l/L

L = profundidad total de un lecho.

\underline{t} = tiempo adimensional = tv/L

$\underline{\lambda}$ = coeficiente adimensional del filtro = $\frac{\lambda' L}{\sqrt{v}}$

F = constante adimensional de depósito. = $(1 - P_s)/C_0$

A, B = parámetros de filtración.

n = número de puntos de contacto promedio de cada grano.

X = parámetro función de $n, \Delta d$ y d (Ecuac. N° 21)

ψ = factor de forma del grano limpio.

K, G = parámetros de pérdida de carga.

h = intervalo de profundidad de una malla en el modelo de DEB. = ΔL

R = intervalo de tiempo adimensional = Δt

A = área de la sección transversal de cualquier lecho.

W = peso del material granular utilizado para el empaque de un lecho.

X_i = tanto por ciento de partículas retenidas entre dos tamices.

ANEXO N°4

PREPARACIÓN DE LA SUSPENSIÓN ARTIFICIAL.

La suspensión utilizada fue una mezcla entre dos tipos de arcillas: bentonita y caolín.

La suspensión para cada carrera se preparó al agregar las arcillas en agua del grifo y logrando la asociación por agitación con aire (se aprovechó también la turbulencia del agua al llenar los tanques de almacenamiento del agua sintética).

Las concentraciones del agua artificial fueron de 125 mg/lit de bentonita y de 50 mg/lit de caolín*; la turbiedad inicial del agua así preparada fue de 45 UNT la que después de un período de sedimentación de más de 20 horas reportó una turbiedad remanente de aproximadamente 22 UNT, la que se mantenía por un tiempo suficiente para realizar las carreras de filtración ejecutadas.

*: Esta combinación entre bentonita y caolín surgió de combinar en diversas proporciones ambas arcillas, encontrándose que una relación en peso 2.5:1 arrojaba suspensiones factibles de ejecutar en las cantidades deseadas.

REFERENCIAS CONSULTADAS

PÁG. 8 (PARTE 8.)

- [1] ADIN A, E. R. Bauman y J. L. Cleasby.
"THE APPLICATION OF FILTRATION THEORY TO PILOT-PLANT DESIGN" EN JOURNAL AWWA
ENERO DE 1979.
- [2] ADIN A y M. Rebbun.
"HIGH-RATE CONTACT FLOCCULATION-FILTRATION WITH CATIONIC POLYELECTROLYTES" EN JOURNAL AWWA
FEBRERO DE 1974.
- [3] ARBOLEDA, J.
"TEORÍA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA"
SERIE TÉCNICA N° 13: CEPIS. 1973.
- [4] CAMP T. R.
"THEORY OF WATER FILTRATION" EN JOURNAL OF SANITARY ENGINEERING DIVISION: ASCE
AGOSTO 1964.
- [5] CLEASBY, J. L.
"APPROACHES TO FILTRABILITY INDEX FOR GRANULAR FILTERS" EN JOURNAL AWWA
AGOSTO 1969.
- [6] CLEASBY, J. L. y K-S, Fan.
"PREDICTING FLUIDIZATION AND EXPANSION OF FILTER MEDIA" EN JOURNAL OF SANITARY ENGINEERING DIVISION: ASCE
OCTUBRE 1982.

[7] CORONADO, J. A.

"DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN MODELO PARA FILTRACIÓN DIRECTA DE AGUAS TURBIDAS"

TESIS, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA: FEBRERO 1984

[8] DEB K. A.

"THEORY OF SAND FILTRATION" EN JOURNAL OF SANITARY ENGINEERING DIVISION: ASCE
JUNIO 1969.

[9] DEB K. A.

"NUMERICAL SOLUTION OF FILTRATION EQUATIONS" EN JOURNAL OF SANITARY ENGINEERING DIVISION: ASCE, ABRIL 1970.

[10] FOX, D. M. Y J. L. CLEASBY.

"EXPERIMENTAL EVALUATION OF SAND FILTRATION THEORY" EN JOURNAL OF SANITARY ENGINEERING DIVISION: ASCE
OCTUBRE 1966.

[11] HUTCHISON W. Y P. D. FOLEY.

"OPERATIONAL AND EXPERIMENTAL RESULTS OF DIRECT FILTRATION" EN JOURNAL AWWA
FEBRERO 1974.

[12] IWASAKI, T.

"SOME NOTES ON SAND FILTRATION," EN JOURNAL OF AWWA, VOL 29, 1937 P. 1593.

[13] OTT, R. CH Y R. H. BOGAN
"THEORETICAL EVALUATION OF FILTER MODELING
EXPERIMENTS" en Journal of sanitary engi-
neering division: ASCE, ABRIL 1970.