



INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMPORTAMIENTO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HELICOIDAL

P. Martínez P.
J. Lozano F.
G. Mendoza G.
H. Mendoza M.

Patrocinado por
OFICINA SANITARIA PANAMERICANA
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRÁULICOS

SEPTIEMBRE 1968

192

RESUMEN

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
1.1 <u>Introducción</u>	1
1.2 <u>Objetivos</u>	2
2. FLOCULACION	3
2.1 <u>Aspectos generales</u>	3
2.2 <u>Clasificación</u>	5
3. FLOCULADORES HIDRAULICOS DE FLUJO HELICOIDAL	6
3.1 <u>Principio de funcionamiento</u>	6
3.2 <u>Análisis dimensional</u>	8
4. METODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACION	9
4.1 <u>Análisis de los datos obtenidos</u>	9
4.2 <u>Lecturas directas en el modelo</u>	10
5. ESTUDIO DE LOS DOS PRIMEROS MODELOS	12
5.1 <u>Primer modelo</u>	12
5.2 <u>Resultados</u>	13
5.3 <u>Segundo modelo</u>	14
5.4 <u>Resultados</u>	14
6. TERCER MODELO	15
6.1 <u>Descripción del modelo</u>	15
6.2 <u>Datos obtenidos</u>	16
6.3 <u>Análisis e interpretación de los datos</u>	17
7. CRITERIO DE DISEÑO HIDRAULICO	20
7.1 <u>Magnitudes convenientes de los caudales para el uso de floculadores hidráulicos de flujo helicoidal</u>	20

7.2 <u>Procedimiento para el diseño</u>	21
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
8.1 <u>Conclusiones</u>	23
8.2 <u>Recomendaciones</u>	24
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	25
TABLAS Y FIGURAS	27

R E S U M E N

En este estudio se determinó el comportamiento hidráulico de un floculador de flujo helicoidal, unidad que, a pesar de usarse en algunas plantas potabilizadoras, no se ha estudiado debidamente.

Sucesivamente se construyeron tres modelos en los que se determinaron velocidades, tiempos de retención y pérdidas de carga para diferentes gastos; todos los cuales son resultados básicos para establecer un diseño racional de aquellas unidades.

Los resultados favorables obtenidos con el tercer modelo sugieren complementar el estudio con pruebas de floculación ortocinética tendientes a fijar criterios precisos de diseño.

A B S T R A C T

This paper describes the hydraulic behaviour of a flocculator through which the water follows a helicoidal path. Although this type of flocculators have been used in several water treatment plants, literature about this topic is meager.

Three models were built at different times, to study detention times, flow velocities and head losses at variable rate of flow. These are the basic variables to be considered in the rational design of a unit. Favorable results were obtained on the third model used.

In order to establish precise design criteria, it is advised to perform a new set of experiments using orthokinetic flocculation.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Uno de los procesos unitarios más empleados en el tratamiento del agua es la floculación. Se trata de una mezcla controlada, que tiene como objeto provocar la coalescencia de micelios primarios, formados por la reacción de ciertos compuestos químicos, con sustancias en solución o suspensión coloidal existentes en el agua.

Se puede estimular esta mezcla por medios mecánicos o hidráulicos. En el primer caso, el empleo de motores eléctricos hace que el costo del tratamiento se eleve y la operación sea más compleja. En cuanto a caudales relativamente pequeños, es más conveniente el empleo de la carga hi-

dráulica para promover el mezclado. En muchos casos se tiene carga disponible, o bien esta se puede obtener mediante un pequeño aumento en la carga de bombeo que, en todo caso, tiene un costo inferior a la instalación de equipo mecánico de mezclado.

Un tipo de floculador hidráulico es aquel que aprovecha la energía hidráulica disponible en la entrada de una masa líquida para agitarla. Si la forma de la masa es prismática, opone una resistencia que provoca agitación, la cual puede ser controlada variando convenientemente la velocidad de entrada. Por la forma del movimiento así inducido se les denomina floculadores de flujo helicoidal.

A pesar de que en algunas plantas se emplean los floculadores hidráulicos de flujo helicoidal, no existe en la literatura disponible alguna información, por lo que se consideró conveniente investigar sobre ellos, para llegar a establecer parámetros de diseño y geometría de los mismos.

Fue necesaria la construcción sucesiva de tres modelos con características diferentes, a fin de obtener resultados satisfactorios.

1.2 Objetivos

Frecuentemente, obras que prestarían un servicio vital a una comunidad pequeña, como es proporcionarle

agua potable, no se ejecutan por falta de fondos por requerir se una inversión inicial elevada, aunque a largo plazo sería posible abastecer la comunidad a un costo relativamente bajo. Se plantea entonces el problema de proyectar obras que requie ren una inversión inicial baja y operación y mantenimiento económicos.

Los floculadores hidráulicos de flujo helicoidal poseen las características necesarias para lograr esos fines, por lo que en este estudio se ha determinado el funcionamiento hidráulico de este tipo de floculadores. Además, para que puedan ser usados en una escala mayor, se propone, desde el punto de vista hidráulico, su geometría más conveniente y la forma de controlar el escurrimiento en ellos, con miras a obtener una agitación propicia para la floculación. En otras palabras, se pretendió establecer los parámetros de diseño asociados a alta eficiencia, bajo costo y sencillez de operación.

2. FLOCULACION

2.1 Aspectos generales

En el presente trabajo se entenderá por floculación aquella etapa del proceso de coagulación que tiene por objeto incrementar la posibilidad de contacto entre los microflóculos formados en el instante de la reacción entre las par

tículas en suspensión coloidal o sustancias en solución, y las sustancias químicas agregadas, con el propósito de formar flóculos mayores que sedimenten fácilmente, en el seno del líquido, por la acción de la gravedad. Esto se logra haciendo pasar el agua por depósitos en los que, por medios hidráulicos o mecánicos, se provoca una cierta agitación de la masa líquida.

El fenómeno de la floculación ha sido explicado teóricamente por Smoloshowski, basándose en las siguientes consideraciones:

a) En el medio líquido del floculador existe un movimiento relativamente uniforme

b) El número de choques es proporcional al número de partículas por unidad de volumen

Estas consideraciones, en realidad, deben tomarse como hipótesis simplificadoras, pues si se calcula el número de Reynolds para un floculador, se obtiene un valor mayor de 2 500, lo que indica que el régimen es francamente turbulento. Esto, y no un gradiente de velocidad que tendría menor influencia, es precisamente lo que se requiere para provocar los choques entre las partículas, lo que hace evidente la necesidad de complementar los estudios con medidas de velocidad en los floculadores, para tener una idea más real de su funcionamiento.

2.2 Clasificación

Los floculadores se clasifican atendiendo a distintos factores de flujo y forma. Sin embargo, lo que aquí interesa es la clasificación de acuerdo con la forma en que se provoca la turbulencia dentro de ellos, es decir, la mezcla lenta.

Fundamentalmente se pueden clasificar en mecánicos, neumáticos e hidráulicos. Su denominación indica la forma en que se efectúa la mezcla.

En los primeros se hace esta por medio de paletas que giran impulsadas por algún tipo de motor. Se emplean cuando se dispone de poca carga hidráulica o el gasto por tratar es grande. A su vez, se les puede clasificar de acuerdo con la posición relativa del eje de las paletas con respecto al flujo.

Los neumáticos efectúan la mezcla por difusión de aire a presión a través de tuberías o placas porosas.

Los floculadores hidráulicos se clasifican de acuerdo con el sentido del flujo. Así, se tienen tres tipos de floculadores hidráulicos:

- a) De flujo horizontal
- b) De flujo vertical
- c) De flujo helicoidal

El criterio para diseñar los de tipo a) y b) es semejante, el del tercero es un poco distinto y a él se dedica este trabajo.

3. FLOCULADORES HIDRAULICOS DE FLUJO HELICOIDAL

3.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de los floculadores hidráulicos de flujo helicoidal consiste, en términos generales, en aprovechar la energía hidráulica disponible a la entrada de la estructura para imprimir un movimiento aproximadamente helicoidal a la masa del líquido en el interior de las celdas.

Un floculador de este tipo estará formado por un número impar de celdas en forma de prisma de base cuadrada, se escogen así porque es fácil construirlas, ya que no requieren de formas especiales (es decir, se puede usar otro tipo de sección). Las celdas se comunican entre sí a través de orificios ahogados, cuya sección de escurrimiento puede variarse mediante la acción de compuertas que obturan una parte de la sección, según sea el caso.

En la parte inferior de las celdas impares hay dos orificios diametralmente opuestos que son las entradas. En la parte superior y en el muro colindante a una de las en

tradas, se encuentra el orificio de salida, también ahogado. En las celdas pares, la disposición de las entradas y la salida es como sigue: dos orificios de entrada diametralmente opuestos en la parte superior de la celda; la salida, en el muro colindante a una entrada y situada en la parte inferior.

Con la disposición de las entradas anteriormente descrita, y debido a la geometría de las celdas, la masa líquida adquiere un movimiento giratorio, como resultado del par mecánico que se forma por la acción de los chorros de agua al entrar en las celdas.

Una de las características del escurrimiento, en la unidad, es que en las celdas impares el movimiento helicoidal es ascendente y en las pares descendente.

El floculador recibe el agua por tratar de un mezclador rápido, y de él pasa a un sedimentador. Es pues conveniente iniciar la floculación con una agitación alta, la que irá disminuyendo en intensidad conforme el líquido se desplaza a lo largo de la unidad, hasta producirse un mínimo de agitación en la entrada del sedimentador.

Para lograr la variación deseada de la agitación y poder controlarla al variar el caudal, se instalan compuertas en las entradas de las celdas. Abriendo o cerrando dichas compuertas, se controla la velocidad de entrada y, por lo tanto, la agitación.

En caso de que se aumente la velocidad, al disminuir la sección de las entradas, se requiere de una carga hidráulica un poco mayor; esto hace que aumente el nivel del agua en la celda anterior o en el mezclador rápido.

3.2 Análisis dimensional

Para tener una longitud característica del modelo, se hará la siguiente consideración: debido al tipo de movimiento que se ha observado en estos floculadores, en que el agua gira en torno a un eje vertical que pasa por el centro geométrico de la base, el ancho de la vena líquida será $b/2$. Además, debido a que no es posible obtener fácilmente la dimensión vertical de dicha vena, o que puede ser muy variable, se tomará $b/2$ como dimensión lineal característica, pues manteniendo las relaciones geométricas mencionadas se tiene definida la geometría de la celda.

Las magnitudes físicas que intervienen en el fenómeno y sus unidades son:

B magnitud lineal característica igual a $b/2$

G gradiente de velocidad

g aceleración debida a la gravedad

V velocidad media del chorro de entrada a las celdas

μ viscosidad dinámica del agua

ρ densidad del agua

De acuerdo con el conocido teorema π o de Buckingham, dado que existen seis magnitudes físicas y tres unidades fundamentales (masa, longitud y tiempo), se pueden establecer tres productos adimensionales que determinan la relación que existe entre las magnitudes físicas.

Los tres productos adimensionales fueron los siguientes:

$$\pi_1 = \frac{V}{GB}$$

$$\pi_2 = \frac{V^2}{Bg}$$

$$\pi_3 = \frac{VB}{L^4}$$

El primer producto relaciona las magnitudes que dependen de la geometría y funcionamiento que se dé al floculador.

El segundo producto es el número de Froude.

El tercero es el número de Reynolds.

4. METODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACION

4.1 Análisis de los datos obtenidos

Para establecer el significado de los resultados de las experiencias, se emplearon los conceptos y métodos estadísticos que en seguida se enumeran:

- a) Distribución normal
- b) Regresión lineal
- c) Coeficiente de correlación

Como se plantea la necesidad de tener un índice que exprese hasta qué punto existe una relación entre las variables o si estas son independientes, se emplea el método c), por medio del cual se obtiene el porcentaje en que una variable está relacionada con otra.

4.2 Lecturas directas en el modelo

El estudio se basó en cuatro tipos de observaciones, que fueron:

- 1) Caudal de operación
- 2) Nivel del agua en las celdas, indicativo de la pérdida de carga entre ellas
- 3) Velocidad del agua en diferentes puntos del seno del líquido en la celda
- 4) Tiempo de retención real.

A continuación se hace una descripción general de los métodos que se emplearon para obtener la información arriba indicada.

Caudal. Se determinó el gasto por medio de un vertedor triangular de 90°. Las lecturas tomadas directamente de los modelos fueron las cargas sobre el vertedor. Los gas-

tos se calcularon utilizando la fórmula para vertedores triangulares de Barr. La medida de la carga se hizo por medio de un limnómetro con aproximación de 0.1 milímetros.

Nivel del agua. Debido a que se contaba con un solo limnómetro, el nivel del agua en las celdas se determinó por medio de piezómetros formados por tubos transparentes y una escala graduada nivelada con el fondo de la celda.

Velocidad del agua. Para este objeto no se pudo emplear tubos de Pitot, por tener velocidades bajas y con variaciones instantáneas en su dirección y magnitud.

En el primer modelo se empleó un micromolinete Gurley de eje vertical muy sensible, pero que no proporcionaba información sobre la dirección del movimiento. En el segundo y tercer modelos se empleó un micromolinete Neyrpic-Grenoble de eje horizontal, que medía velocidades paralelas a su eje, aunque de menor sensibilidad que el anterior. En el tercer modelo se empleó un péndulo con una esfera de pasta en la punta, que mostraba cualitativamente la dirección y magnitud de las corrientes.

Tiempo de retención. Se empleó el método clásico para este tipo de estudios. El trazador usado fue cloruro de sodio en una solución concentrada que se introdujo en el influente del modelo, en un tiempo relativamente corto. A continuación se tomaron muestras del efluente a intervalos con-

venientes de tiempo, y se determinó la concentración de cloruros de cada muestra. Con los datos de tiempo transcurrido y concentración, se trazó una curva cuya distancia del centro de gravedad de la superficie bajo ella, al origen, representa el tiempo real de retención.

5. ESTUDIO DE LOS DOS PRIMEROS MODELOS

5.1 Primer modelo

Con la colaboración de la Sección de Hidráulica se construyó el primer modelo en el que se iniciaron los estudios.

El modelo estaba formado por dos celdas prismáticas de base cuadrada de 1 m por lado y altura de 1.70 m. La primera tenía la entrada en la parte inferior y la salida a 1.35 m del fondo de la celda. La salida de la primera celda constituía la entrada a la segunda que tenía su salida en la parte inferior. Los ejes de las entradas y salidas estaban localizadas en un mismo plano vertical.

Los estudios que se hicieron en este primer modelo fueron:

a) Determinación de la magnitud de las pérdidas de carga en cada celda y su relación con la carga de velocidad de la entrada

b) Determinación de las velocidades del líquido en distintos puntos del seno del mismo en la celda.

5.2 Resultados

El gradiente de velocidad tuvo valores, para velocidades de entradas óptimas, menores que el límite inferior recomendado que es de 30 m/seg por metro.

El tener una sola entrada a las celdas presentó el inconveniente de dejar casi al 30 por ciento del volumen total de agua sin movimiento, y por lo tanto dio lugar a los siguientes problemas:

a) Establecimiento de zonas de sedimentación o de difícil formación de flóculo

b) Tiempo de retención inferior al teórico y un volumen grande inútil.

Aunque estos floculadores son útiles para gastos pequeños, no es recomendable tener el 30 por ciento del volumen inútil y hasta perjudicial; es mejor sacrificar sencillez en el diseño y la construcción, a cambio de obtener un funcionamiento más eficiente.

Surgió así la necesidad de un nuevo diseño, que evitara la formación de zonas muertas dentro del floculador y produjera mayor grado de agitación.

5.3 Segundo modelo

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de los estudios en el primer modelo, se diseñó un segundo de una sola celda, que se construyó en el mismo lugar del anterior.

Las dimensiones de la celda única fueron iguales a las del primer modelo. En este caso se hicieron dos entradas en la parte inferior, diametralmente opuestas. De esta manera, el escurrimiento del agua por los orificios de entrada produce un par mecánico, imprimiéndole a la masa de agua un movimiento de tipo helicoidal.

5.4 Resultados

Se hicieron estudios semejantes a los realizados en el modelo anterior; además, se determinó el tiempo de retención real utilizando cloruro de sodio como trazador.

Los resultados de las experiencias en el segundo modelo fueron mejores; el gradiente de velocidad aumentó y se obtuvo una expresión que relaciona la pérdida de carga con la carga de velocidad en las entradas; la distribución de las velocidades fue mejor que la obtenida en el primer modelo. Las zonas muertas se redujeron a un mínimo, siendo su volumen menor del 10 por ciento del correspondiente al agua en la celda.

Lo satisfactorio de los resultados obtenidos en el segundo modelo, estimuló la construcción de un tercer modelo que tuviera celdas con flujo ascendente y descendente para que el estudio resultase más completo.

6. TERCER MODELO

6.1 Descripción del modelo

Con base en los resultados de la operación de los modelos primero y segundo, se diseñó un nuevo modelo de cinco celdas prismáticas. El lado de la base en cada celda se construyó de 1.10 m; la altura en la primera celda fue de 1.80 m y en las demás de 1.70 m.

El agua llega al modelo por un canal con un aforador Pars-hall en su extremo, cuya base se encuentra 2 m arriba del fondo de las celdas del floculador. Del aforador pasa, por medio de un tubo vertical, a los conductos de entrada que se encuentran en la parte inferior.

La salida de la última celda es un vertedor rectangular, cuya cresta es ajustable, lo que permite controlar el nivel del agua en el floculador.

El aforo se hizo por medio de un vertedor triangular, colocado después de la descarga de la última celda.

El nivel del líquido se registró por medio de

piezómetros instalados en cada celda y en el tubo vertical de entrada.

En las figs 1 a 3 se indica, en forma esquemática, la posición de los conductos de comunicación entre las celdas.

6.2 Datos obtenidos

Se hicieron determinaciones de pérdida de carga con tres distintas relaciones del área de las entradas al área de los conductos (A_e/A_c).

En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos cuando la relación A_e/A_c era igual a la unidad. En la tabla 2 se encuentran los datos obtenidos cuando la relación A_e/A_c era de 0.75. Por último, en la tabla 3 se muestran los datos obtenidos para la relación A_e/A_c igual a 0.5. Este fue el caso que se consideró para llegar a los resultados finales. La razón se explica más adelante.

En la tabla 1 faltan los datos relativos a la pérdida de carga en la primera celda y, por lo tanto, los valores de los gradientes, debido a que la caída inmediatamente después del aforador Parshall provocaba una succión muy grande, formando en el tubo vertical una cámara de aire sometida a presión, de volumen variable, que impedía obtener la carga hidráulica en el tubo por medio del piezómetro instalado en ese punto. Las posibles soluciones para remediar este proble-

ma eran demasiado complicadas, sobre todo si se consideraba la existencia de otras dos celdas que trabajaban en las mismas condiciones, y cuyo funcionamiento puede considerarse igual al de la primera.

El valor del gradiente que aparece en las tablas es el absoluto del valor medio del gradiente. Dicho valor para cada una de las pruebas aumenta al pasar de una celda a otra, ya que el nivel del agua en cada celda -así como el tiempo de retención- va siendo menor porque la carga se pierde. Sin embargo, en condiciones reales de operación, las áreas de entrada a las celdas se hacen mayores, perdiéndose menos carga y, como consecuencia, disminuyendo el valor del gradiente. Las pruebas se hicieron en esas condiciones para facilitar los cálculos y hacer comparaciones.

Los datos obtenidos de la distribución de velocidades en planos horizontales a distintos niveles, se presentan gráficamente en las figs 4 y 5. Los resultados de las pruebas para determinar el tiempo medio real de retención, se presentan gráficamente en las figs 6 y 7.

6.3 Análisis e interpretación de los datos

Pérdidas de carga. De las determinaciones efectuadas, se llegó a las siguientes expresiones de la pérdida de carga en función de la carga de velocidad:

a) En las celdas de flujo ascendente:

$$H_f = 3.15 H_v$$

b) En las celdas de flujo descendente:

$$H_f = 2.70 H_v$$

Estos coeficientes se aplican en el caso de que el área de los conductos entre celdas sea cuando menos dos veces el área de la entrada a la celda. Esto es, que la velocidad en estos conductos sea menos de 0.23 m/seg y preferentemente de 0.1 m/seg.

En las experiencias realizadas con las compuertas totalmente abiertas, se obtuvieron coeficientes de pérdida de carga de 6.5 a 7.5. Esto quiere decir que la pérdida de carga total en los conductos es, en este caso, mayor que la pérdida de carga que se verifica en las celdas.

Tiempo medio real de retención. En los estudios hechos en este modelo, se dedicó especial atención a las pruebas de tiempo de retención. Tuvieron por objeto determinar la clase de mezclado que se efectúa en el floculador, así como obtener información sobre la magnitud de las zonas muertas.

Los experimentos se realizaron en dos gamas distintas de caudal: 8 a 9 lt/seg, y 11 a 12 lt/seg. En las figs 6 y 7 se muestran las curvas representativas, formadas con los promedios de todas las pruebas efectuadas de la concentración del trazador en el efluente del floculador.

Los resultados de las pruebas se pueden resumir de la forma siguiente:

a) Relaciones del tiempo de retención real al teórico:

Para la gama inferior de gastos (de 8 a 9 lt/seg) 0.9506.

Para la gama superior de gastos (de 11 a 12 lt/seg),
0.9421.

b) Hay menor recuperación del trazador cuando el gasto es menor:

Para la gama inferior de caudales se observó una recuperación del 91.12 por ciento.

Para la gama superior de caudales, se obtuvo una recuperación del 95.54 por ciento.

El haber obtenido valores cercanos a la unidad, para la razón del tiempo medio real al teórico de retención, indica la ausencia de zonas muertas de magnitud importante.

Distribución de las velocidades en las celdas.

La distribución de las velocidades en las celdas se muestra en las figs 4 y 5. En las celdas de flujo ascendente es bastante satisfactorio. En las celdas de entrada superior y flujo descendente, el volumen bajo de la misma es mayor; a pesar de esto, se observa una agitación mayor en el líquido situado arriba de la entrada.

7. CRITERIO DE DISEÑO HIDRAULICO

7.1 Magnitudes convenientes de los caudales para el uso de floculadores hidráulicos de flujo helicoidal

La principal limitación que puede existir en el uso de este tipo de floculadores es que con caudales relativamente grandes, el número de celdas también sería grande, perdiéndose sencillez y economía en la estructura. Por otro lado, las celdas no pueden tener dimensiones muy amplias. Esto se debe a que los conductos de comunicación tendrían que ser, en este caso, de grandes diámetros y no podrían instalarse dentro de los muros. Instalarlos fuera de los muros requeriría estructuras caras y complicadas.

Otra limitación importante es el tiempo de retención por celda. Este estudio se refirió únicamente al comportamiento hidráulico del floculador; por lo tanto, la única información que se obtuvo acerca de su eficiencia en la floculación, fue el valor del gradiente de velocidad. Tomando el valor de 30 m/seg por metro como mínimo para dicho gradiente y una velocidad máxima de entrada de 0.45 m/seg, se obtienen tiempos de retención de 210 seg por celda. Disminuyéndose el gradiente, el tiempo de retención puede aumentarse; esto se determinará por medio de estudios posteriores, en los que se hagan pruebas de coagulación en el modelo.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede establecer que para un gasto máximo de 12 lt/seg en este tipo de unidad, sería recomendable disponer de siete celdas, con un tiempo de retención total de aproximadamente 25 min.

El límite inferior del caudal, en el presente caso, fue de 4 lt/seg, obteniéndose resultados satisfactorios.

7.2 Procedimiento para el diseño

Independientemente del valor del tiempo de retención por celda, es posible establecer la siguiente secuela para el diseño de este tipo de floculadores:

1o. Para gastos mayores de 12 lt/seg, construir dos unidades en paralelo.

2o. Calcular el número de celdas a partir del tiempo de retención por celda, siendo siempre conveniente un número impar de ellas por razones estructurales. Tomando los 210 segundos mencionados anteriormente se tendrán siete celdas.

3o. El volumen de cada celda se obtiene al multiplicar el gasto por el tiempo de retención por celda.

4o. Las dimensiones de la celda se determinan con base en las relaciones geométricas expuestas en el cap 3. De la fig 3 se pueden obtener las dimensiones, a partir del volumen de cada celda.

5o. El diámetro de los conductos se calcula con la re-

lación $D = 1.13 \sqrt{Q/V}$, siendo V la velocidad del agua en los conductos (menor de 0.23 m/seg), y usando metros como unidad lineal.

6o. El área de las entradas se puede variar por medio de las compuertas. La velocidad en las entradas variará de 0.5 a 0.3 m/seg. Para producir una gama en el gradiente desde 40 m/seg por metro, hasta 20 m/seg por metro.

7o. El tirante calculado es el correspondiente a la celda media. El nivel en las demás celdas se calcula a partir de las expresiones de pérdida de carga, tomando en cuenta si es celda de entrada inferior o superior, y su posición de acuerdo con la celda media. Un bordo libre de 10 cm se considera suficiente en la primera celda. La altura que se obtenga, al sumar la altura del agua y el bordo libre en esta celda, será la altura de los muros del floculador.

8o. La posición de los conductos superiores se determina haciendo que la clave de los mismos esté 10 cm abajo de la superficie libre del agua en la celda de entrada superior de más bajo nivel. Todos los demás se instalarán a esta misma altura.

Los conductos de comunicación entre las celdas pueden ser tubos de lámina de acero galvanizada. En las entradas es conveniente darles forma cuadrada; esto se puede hacer cortando la lámina o con relleno de mortero, y cuidando que

el cambio de forma sea suave. Las salidas de las celdas deberán tener áreas que permitan velocidades muy bajas, del orden de 0.1 m/seg.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

Habiéndose estudiado solamente el comportamiento hidráulico del modelo, las conclusiones a que se llegó son las siguientes:

- a) Su funcionamiento hidráulico es satisfactorio.
- b) Es posible controlar la turbulencia en el interior de las celdas por medio de las compuertas, las que permiten obtener valores adecuados para el gradiente de velocidad.
- c) La agitación que se provoca en el seno de las celdas es suficientemente homogénea para los fines que se persiguen.
- d) Se puede inferir que existe un tiempo de retención más conveniente por celda. Su valor parece ser 210 segundos, resultante de la combinación de las siguientes condiciones:
 - 1. Mínimo de espacios muertos. Esto se obtiene reduciendo convenientemente el tiempo de retención en cada celda.
 - 2. Un número no muy grande de celdas, que tiene como

consecuencia disminución en las dificultades de construcción y en el costo de la estructura.

3. Un gradiente de velocidad mayor que 30 m/seg por metro.

3.2 Recomendaciones

El estudio hidráulico no proporciona toda la información necesaria sobre el funcionamiento del floculador como tal; por lo tanto, se sugieren las siguientes recomendaciones para estudios futuros;

a) Instalar los dispositivos necesarios para la dosificación de coagulantes, con miras a realizar estudios completos sobre floculación en el mismo modelo y determinar eficiencias.

b) Modificar la salida del floculador, para evitar la posibilidad de destrucción del flóculo.

c) Investigar si el límite inferior del valor del gradiente de velocidad (30 m/seg por metro) puede ser menor para este tipo de floculadores.

d) Verificar, con las pruebas de floculación, el valor del tiempo de retención más conveniente, obtenido de los estudios hidráulicos.

e) Construir, a continuación del floculador, un tanque de sedimentación, con miras a complementar el presente estudio.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. C.O. Bennet y J.E. Myers, "Momentum, Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill Book Co., Inc., Nueva York (1962)
2. G.M. Fair y J.Ch. Geyer, "Water Supply and Waste Water Disposal", John Wiley and Sons, Inc., Nueva York (1964)
3. J. Hinze, "Turbulence. An introduction to its mechanism and theory", McGraw-Hill Book Co., Inc., Nueva York (1959)
4. P.G. Hoel, "Introduction to Mathematical Statistics", John Wiley and Sons, Inc., Nueva York (1962)
5. H.E. Hudson, "Flocculation and Flocculation Aids", Journal AWWA, Vol 49, No 1 (Ene 1957)
6. Ch. Jaeger, "Engineering Fluid Mechanics", Blackie and Son Limited, Londres (1956)
7. S.H. Maron y C.F. Prutton, "Principles of Physical Chemistry", The MacMillan Co., Nueva York (1965)
8. L. Miller y J.E. Freund, "Probability and Statistics for Engineers", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. (1965)
- 9.- L.G. Rice, "Unit Operations of Sanitary Engineering" John Wiley and Sons, Inc., Nueva York (1961)
- 10.- H. Rouse, "Engineering Hydraulics", John Wiley and Sons, Inc., Nueva York (1950)
- 11.- C.N. Sawyer, "Chemistry for Sanitary Engineers", McGraw-Hill Book Co., Inc., Nueva York (1960)

TABLA 1

DATOS COMUNES A LAS CINCO CELDAS			TIEMPO DE RETENCION TOTAL (m n)	CELDA No 1
NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	GASTO (lt/seg)	VELOCIDAD MEDIA DE ENTRADA m/seg		TIEMPO DE RETENCION (seg)
1	11.06	0.304	15.05	189
2	12.23	0.336	13.25	169
3	9.98	0.274	16.50	206
4	7.20	0.198	22.67	278
5	15.10	0.415	10.40	140
6	8.78	0.241	18.97	235
7	5.83	0.160	28.40	346
8	17.70	0.486	8.90	120
9	15.70	0.431	10.08	133
10	11.98	0.329	13.83	176
11	10.50	0.288	15.88	199
12	8.24	0.226	20.30	250
13	11.47	0.315	14.42	182
14	12.10	0.332	13.58	173
15	10.70	0.294	15.38	193
16	8.56	0.235	19.47	240
17	6.87	0.189	23.82	291
18	16.22	0.446	9.95	132
19	15.22	0.418	10.67	140
20	13.48	0.370	12.12	156
21	8.63	0.237	19.28	238
22	16.43	0.451	9.70	129
23	15.10	0.415	10.73	140
24	11.22	0.308	14.72	185
25	8.62	0.237	19.22	237
26	17.40	0.478	9.13	123
27	14.05	0.386	11.60	150
28	9.41	0.259	17.78	221
29	14.36	0.395	11.38	148
30	13.66	0.375	12.00	155
31	9.02	0.248	18.28	227
32	16.88	0.464	9.40	126
33	7.77	0.213	21.33	262
34	6.27	0.172	25.60	320
35	13.08	0.359	12.48	160
36	9.22	0.253	18.05	224
37	11.54	0.317	14.25	181

TABLA 1 (CONTINUACION)

NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	CELDA 2			CELDA 3		
	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRADIEN- TE	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRADIEN- TE
1	3.075	185	37.6	3.065	181	37.9
2	4.562	164	48.6	4.052	159	46.6
3	2.368	202	31.6	2.708	198	34.1
4	1.354	275	20.5	1.494	272	21.6
5	7.487	133	69.1	8.177	125	74.5
6	1.956	231	26.8	2.046	227	27.6
7	0.966	343	15.5	0.956	341	15.4
8	7.377	114	74.1	8.067	107	80.0
9	5.880	127	66.4	6.470	121	67.4
10	3.503	171	59.7	4.043	166	45.4
11	2.952	195	35.8	3.142	191	37.4
12	1.662	247	23.9	2.002	244	26.4
13	3.374	178	39.8	3.514	173	41.6
14	3.637	168	42.9	3.927	183	45.2
15	2.996	189	36.7	3.136	185	37.9
16	1.731	237	24.9	2.071	234	27.4
17	1.084	289	17.8	1.224	286	19.0
18	6.523	126	66.3	6.963	120	70.2
19	5.772	134	60.5	6.212	123	64.3
20	4.423	151	49.9	5.013	145	54.1
21	1.621	235	24.2	2.111	232	27.8
22	6.537	123	67.2	7.177	117	72.0
23	5.637	135	59.5	5.977	129	62.6
24	2.910	181	36.9	3.450	176	40.7
25	1.571	234	23.9	2.061	231	27.5
26	7.188	116	72.5	7.978	110	73.4
27	4.876	145	53.4	5.366	139	57.1
28	2.229	217	29.5	2.619	213	32.2
29	5.020	142	54.8	5.510	137	58.5
30	4.642	149	51.4	5.032	144	45.5
31	1.875	223	26.7	2.565	219	31.6
32	6.646	120	68.6	7.546	113	75.2
33	1.608	259	23.0	1.508	256	22.4
34	0.780	278	15.4	1.270	315	18.5
35	4.082	155	47.4	4.672	150	51.4
36	2.055	220	28.1	2.246	217	29.8
37	3.564	177	41.3	3.854	168	44.0

TABLA 1 (CONTINUACION)

NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	CELDA 4			CELDA 5		
	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRADIEN- TE	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRADIEN- TE
1	3.425	176	40.6	3.45	172	41.2
2	4.062	154	47.4	4.19	149	43.3
3	2.9220	194	35.7	2.85	190	36.6
4	1.600	269	22.5	1.48	266	21.7
5	8.39	117	77.8	8.62	109	81.9
6	2.11	224	28.3	2.14	221	28.6
7	0.97	338	16.0	1.10	336	16.6
8	8.08	100	82.6	8.56	93	88.4
9	6.53	115	69.4	6.91	109	73.4
10	4.10	161	46.5	4.18	156	47.7
11	3.05	186	36.3	3.33	182	29.4
12	1.76	240	24.9	1.99	237	26.8
13	3.67	168	43.1	3.65	164	43.5
14	4.14	158	47.0	4.07	153	47.5
15	3.20	180	38.8	3.43	176	40.7
16	1.93	230	16.7	2.06	227	27.3
17	1.43	283	20.7	1.28	280	19.7
18	7.27	113	73.8	7.40	106	77.0
19	6.17	122	65.5	6.50	116	69.0
20	4.67	140	53.2	4.90	135	55.6
21	2.02	228	27.4	2.24	224	29.1
22	7.34	110	75.2	7.57	103	79.0
23	6.14	123	65.0	6.17	117	66.9
24	3.46	174	41.0	3.49	167	42.1
25	1.92	227	26.8	2.15	224	23.6
26	8.19	103	82.1	8.27	76	85.5
27	5.13	134	57.0	5.51	128	60.5
28	2.28	210	30.3	2.66	206	33.1
29	5.47	131	59.5	5.75	125	62.4
30	5.04	139	55.5	5.37	133	53.5
31	1.87	216	27.0	2.30	212	30.4
32	7.68	106	78.4	7.91	99	82.5
33	1.66	253	23.6	1.89	250	25.4
34	0.98	313	16.6	1.36	310	19.3
35	4.48	145	51.2	4.86	139	54.5
36	2.20	213	29.6	2.58	209	32.4
37	3.71	167	43.4	4.19	162	46.8

TABLA 2

DATOS COMUNES A LAS CINCO CELDAS			TIEMPO DE RETENCION TOTAL (min)	CELDA No 1
NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	GASTO (lt/seg)	VELOCIDAD MEDIA DE ENTRADA m/seg		TIEMPO DE RETENCION (seg)
1	17.38	0.653	9.00	120
2	15.16	0.570	10.63	138
3	11.88	0.447	13.80	175
4	10.88	0.409	15.30	192
5	6.40	0.241	25.30	314
6	11.32	0.426	14.40	180
7	10.24	0.385	16.00	199
8	9.38	0.353	17.60	218
9	8.56	0.322	19.20	236
10	7.46	0.280	22.10	270

TABLA 2 (CONTINUACION)

No. De ORDEN	CELDA No. 2			CELDA No. 3		
	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETENCION	GRAD.	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETENCION	GRAD.
1	6.20	115	67.6	7.49	108	76.3
2	4.88	134	55.6	5.67	128	61.5
3	3.02	171	38.3	3.56	166	42.9
4	2.45	188	33.4	2.84	184	36.2
5	0.67	312	13.5	1.16	310	17.9
6	2.34	177	33.6	3.23	173	39.8
7	1.94	196	29.0	2.63	192	34.2
8	1.73	215	26.2	2.17	212	29.6
9	1.38	233	22.4	1.87	230	26.3
10	0.74	268	15.3	1.49	265	21.8

TABLA 2 (CONTINUACION)

NO. DE ORDEN	CELDA No 4			CELDA No 5		
	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.
1	7.55	102	79.5	8.08	95	34.5
2	5.78	122	63.5	6.11	116	67.1
3	3.47	162	42.7	3.70	157	44.3
4	2.80	130	36.4	3.18	176	39.2
5	0.87	303	15.5	0.95	305	16.3
6	3.09	169	39.6	3.42	164	42.1
7	2.44	189	33.2	2.87	184	36.5
8	1.78	209	27.0	2.51	205	32.4
9	1.63	227	24.7	1.91	223	27.0
10	1.24	263	20.1	1.52	260	22.4

TABLA 3

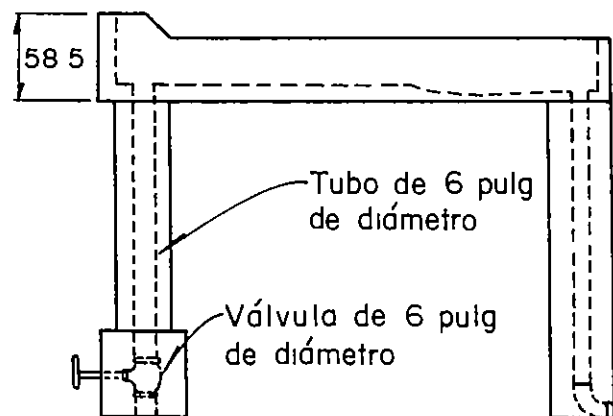
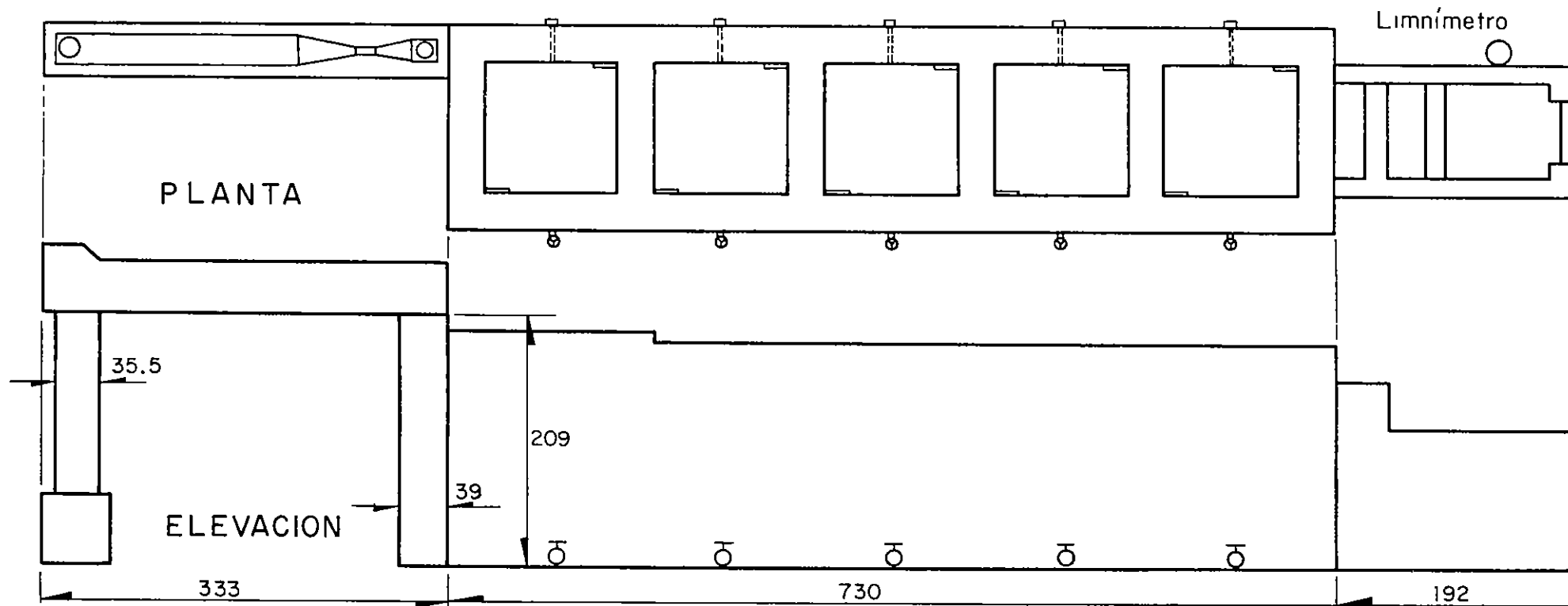
DATOS COMUNES A LAS CINCO CELDAS			TIEMPO DE RETENCION TOTAL (min)	CELDA No 1
NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	GASTO (lt/seg)	VELOCIDAD MEDIA DE ENTRADA (m/seg)		TIEMPO DE RETENCION (seg)
1	13.26	0.663	12.3	161
2	10.18	0.509	16.2	206
3	11.26	0.563	14.6	186
4	9.38	0.469	17.4	222
5	17.70	0.885	8.7	122
6	15.16	0.758	10.5	142
7	12.35	0.618	13.0	163
8	10.26	0.513	16.1	204
9	5.83	0.292	28.0	342
10	8.62	0.431	19.4	241
11	7.12	0.356	23.0	284
12	8.40	0.420	19.8	246
13	11.98	0.599	13.6	176
14	8.80	0.440	13.9	236
15	9.50	0.425	19.5	242
16	11.44	0.572	14.3	134
17	12.78	0.639	12.7	166
18	12.03	0.604	13.2	171
19	9.26	0.463	18.0	226
20	11.92	0.596	13.7	177
21	11.76	0.588	13.3	179
22	8.20	0.410	19.5	242

TABLA 3 (CONTINUACION)

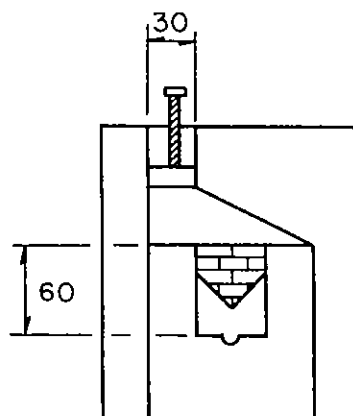
	CELDA No. 2			CELDA No 3		
NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.
1	6.29	154	58.9	6.65	148	62.0
2	3.80	200	40.3	3.89	195	31.1
3	4.55	181	46.2	4.94	175	49.0
4	2.99	218	34.2	3.18	213	35.7
5	10.03	114	87.7	11.42	105	96.4
6	7.73	135	70.0	8.72	127	76.6
7	6.80	160	60.2	6.09	154	58.0
8	3.58	199	39.1	4.17	194	42.3
9	1.01	339	15.9	1.30	336	18.2
10	2.17	237	27.9	2.66	232	31.3
11	1.52	280	21.5	1.91	277	24.2
12	2.10	242	27.2	2.79	238	31.6
13	4.85	170	49.4	5.34	164	52.7
14	2.45	232	30.0	2.84	227	32.6
15	2.18	239	27.9	2.77	234	31.8
16	5.53	178	51.6	4.82	172	48.9
17	5.33	160	55.6	6.12	153	59.0
18	4.69	166	49.1	5.58	159	54.6
19	2.80	221	32.9	3.19	216	35.4
20	5.16	171	50.6	5.35	164	52.7
21	5.18	173	50.5	5.37	166	52.5
22	1.92	239	26.2	2.71	234	31.5

TABLA 3 (CONTINUACION)

NUMERO DE ORDEN DE LA LECTURA	CELDA No 4			CELDA No 5		
	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.	PERDIDA DE CARGA (cm)	TIEMPO DE RETEN- CION	GRAD.
1	6.31	141	61.9	7.44	133	69.1
2	3.70	190	40.7	4.33	184	44.7
3	4.80	167	49.5	5.73	162	55.0
4	3.14	203	35.8	3.17	184	38.4
5	11.13	96	99.4	12.26	86	110.0
6	8.43	119	77.8	9.86	110	87.4
7	5.25	148	55.0	6.48	140	62.7
8	3.68	188	40.8	4.41	182	45.5
9	1.21	333	17.6	1.44	330	19.3
10	2.47	228	30.4	3.10	224	34.4
11	1.72	273	23.2	2.15	269	26.2
12	2.40	234	22.6	2.93	229	33.1
13	5.05	158	52.1	6.08	151	53.5
14	2.75	223	32.4	3.18	218	35.3
15	2.48	230	30.3	3.01	225	33.4
16	4.73	166	49.4	5.56	159	54.6
17	6.03	146	59.4	7.06	138	66.0
18	5.34	153	54.5	6.17	146	60.0
19	3.00	212	34.7	3.63	206	38.7
20	5.26	159	53.0	6.09	152	58.4
21	5.18	160	52.5	6.01	153	57.9
22	2.32	230	29.4	3.05	225	34.0



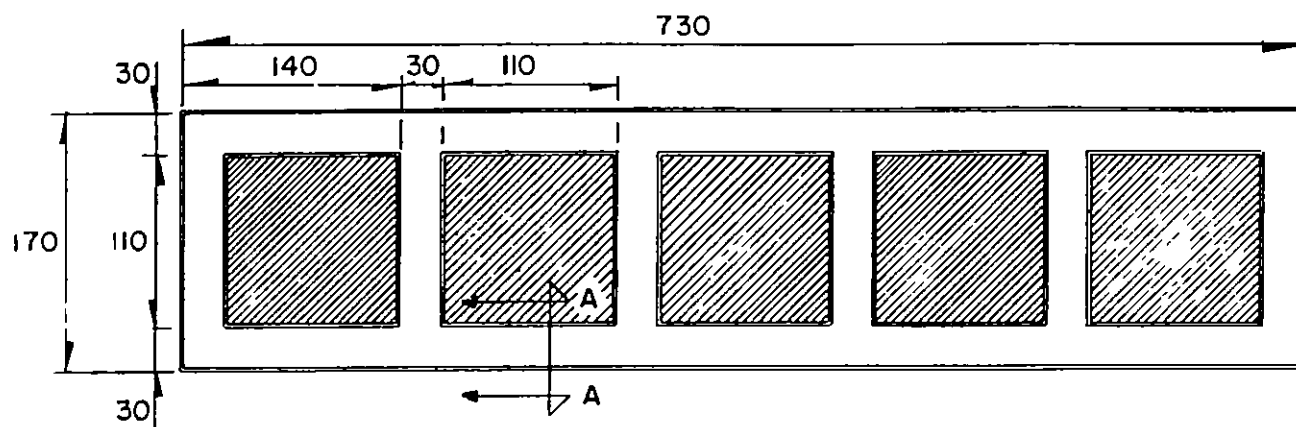
DETALLE DEL CANAL Y CONDUCTOS DE ENTRADA



0 50 100 250
centímetros

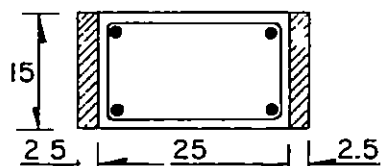
Acotaciones en cm, excepto las indicadas en otra unidad

Fig 1 Floculadores hidráulicos de flujo helicoidal



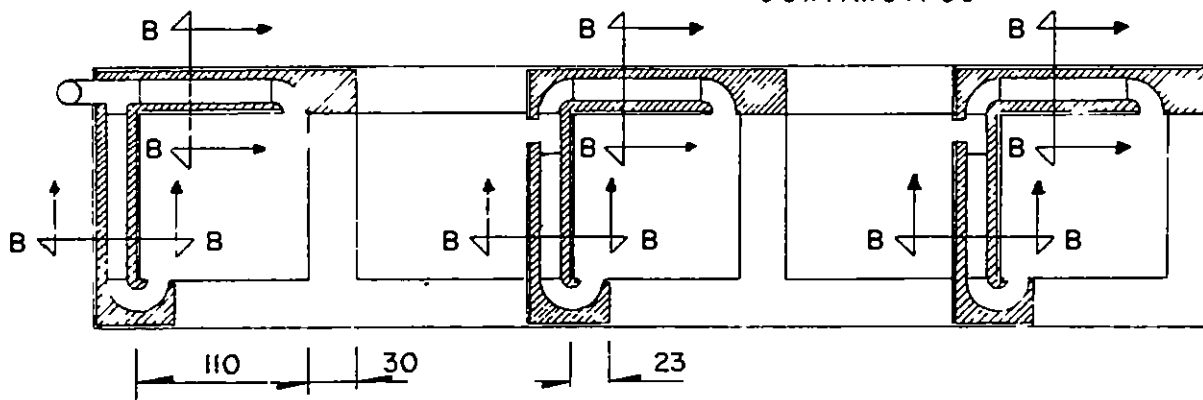
PLANTA DE LA TRABE INFERIOR Y BASE DEL MODELO

4 varillas $\phi 3/8''$
con estribos de alam
brón cada 30 cm.
Tubo de lámina gal
vanizada de 152 mm
de diámetro



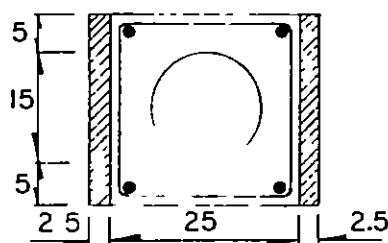
CORTE A-A

0 50 100 250
centímetros



COLOCACION DE LA TUBERIA DE LOS CONDUCTOS INFERIORES

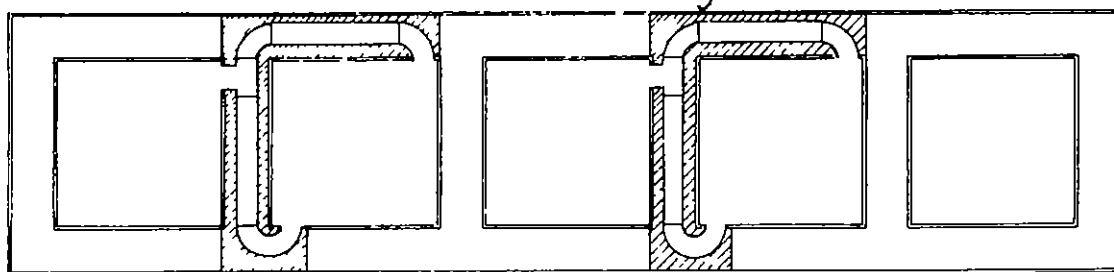
Acotaciones en cm



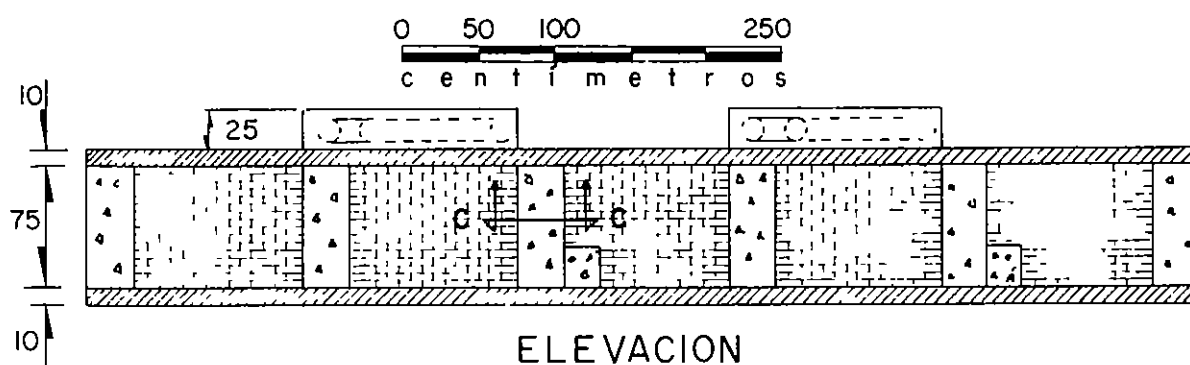
CORTE B-B

Fig 2 Floculadores hidráulicos de flujo helicoidal.
Conductos inferiores

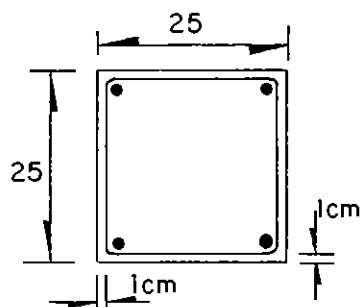
COLOCACION DE LA TRABE Y CONDUCTOS INTERMEDIOS



PLANTA



ELEVACION



CORTE C-C

4 varillas ϕ 3/8"
con estribos de alambón
cada 30 cm

Acotaciones en cm

Fig 3 Floculadores hidráulicos de flujo helicoidal.
Conductos intermedios

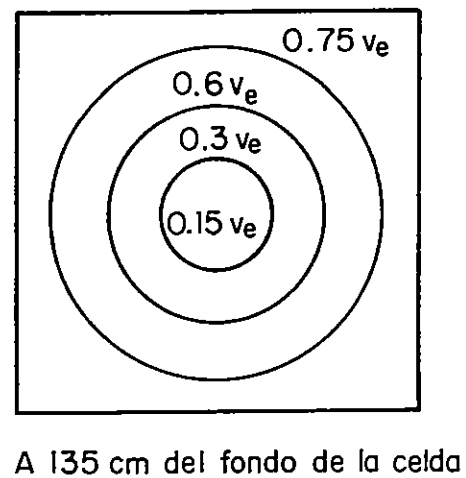
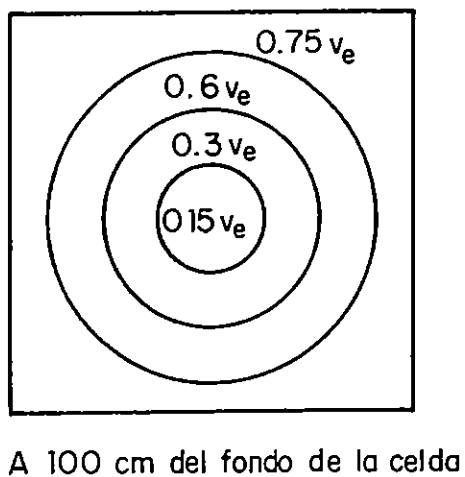
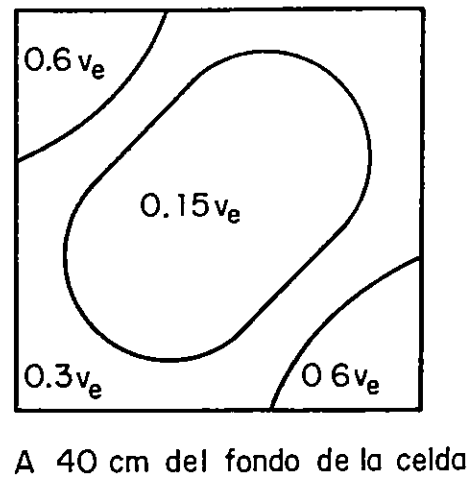
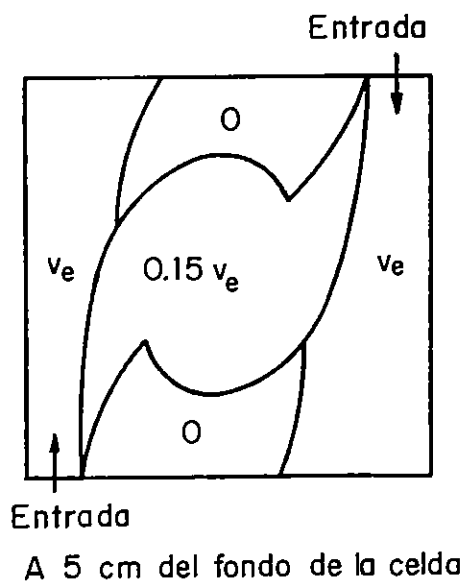


Fig 4 Distribución de las velocidades horizontales en planos horizontales a distintas profundidades en celdas de entrada inferior

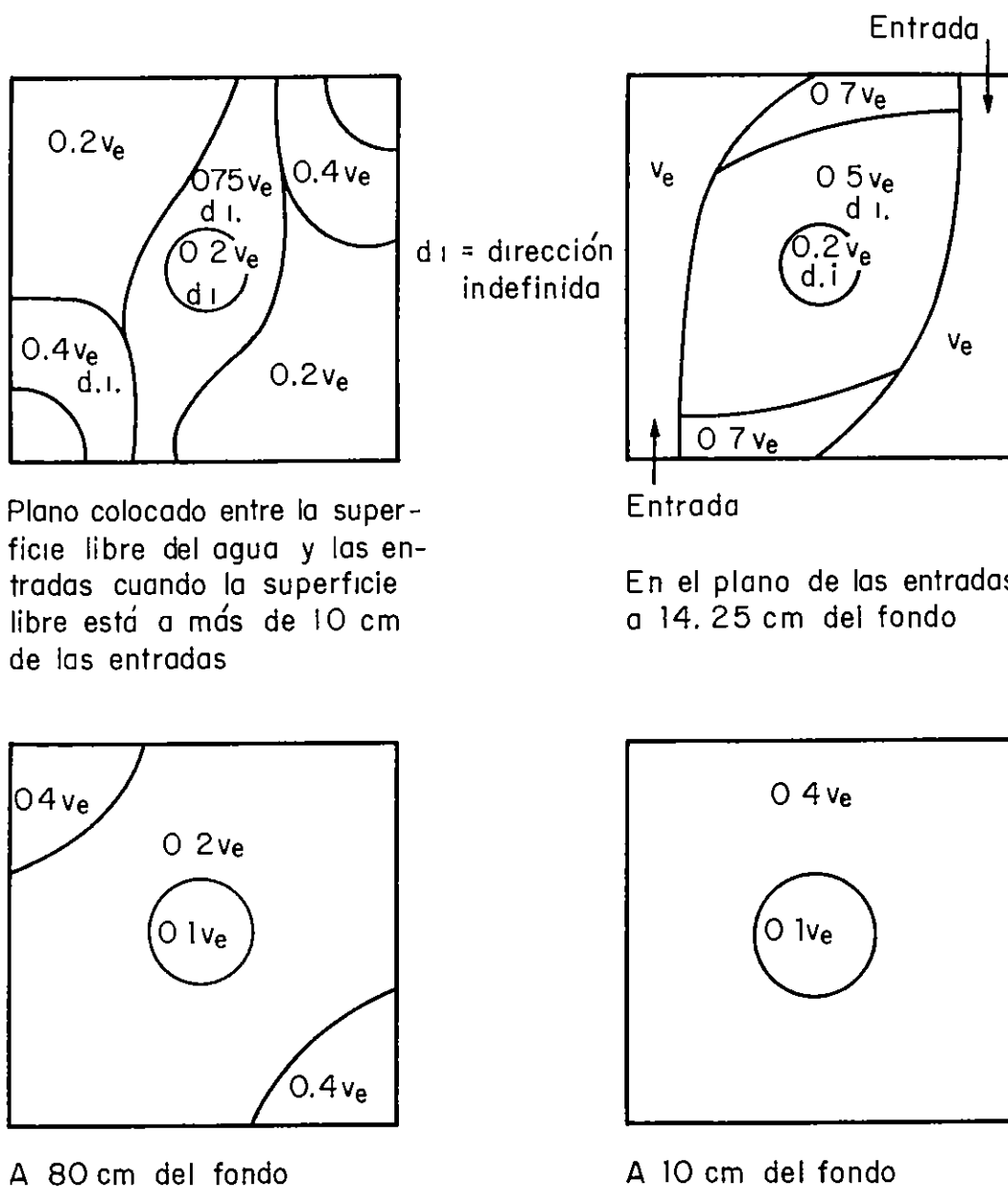
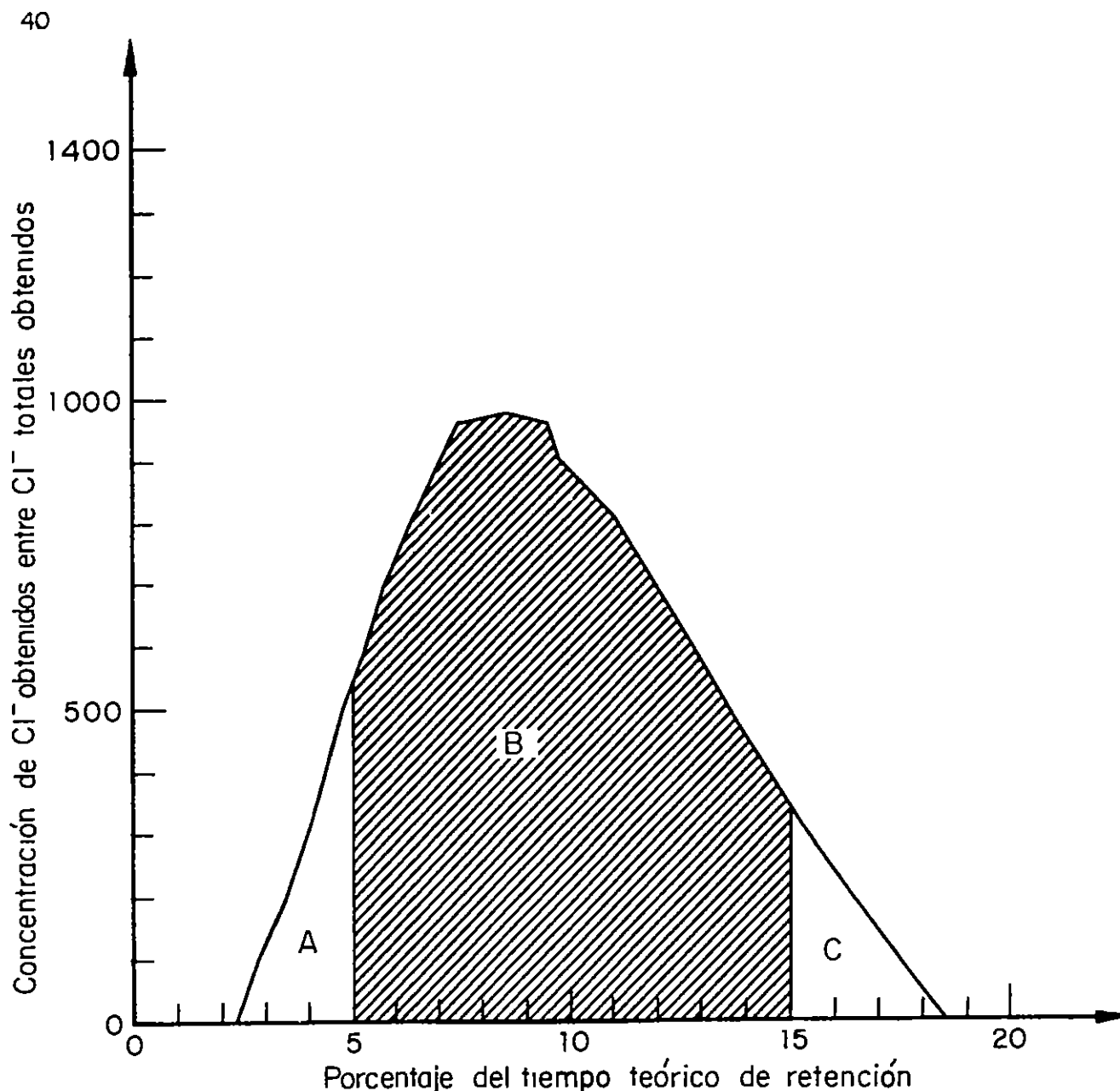
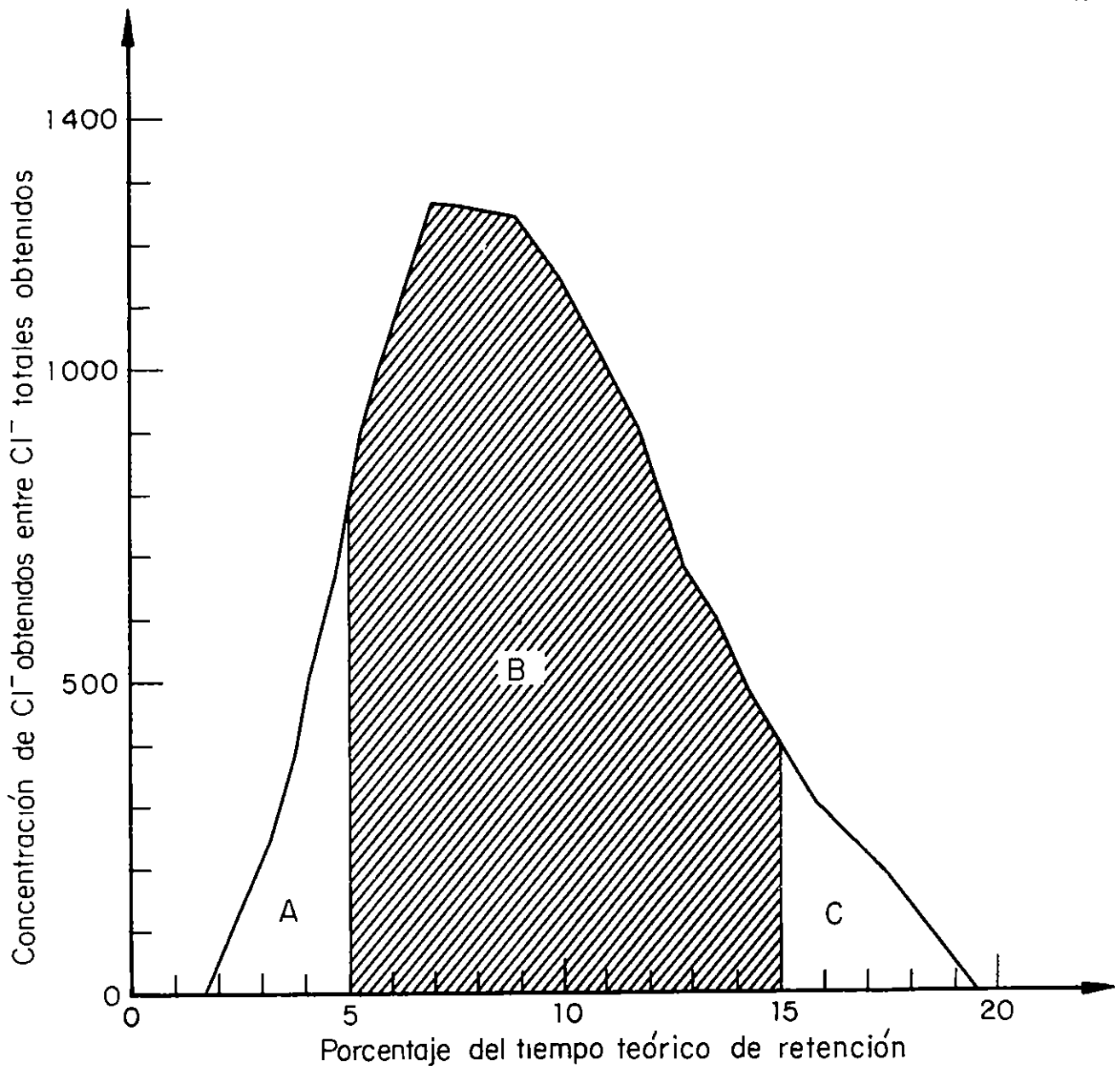


Fig 5 Distribución de las velocidades horizontales a distintas profundidades en celdas de entrada a 1.35 m del fondo



- A. — El 6.77 % del trazador obtenido pasa por el floculador antes de transcurrir un tiempo igual a la mitad del de retención teórico; puede considerarse que es debido a los corto circuitos
- B. — El 87.34 % del total del trazador obtenido pasa por el floculador en un tiempo igual al de retención, después de transcurrido 0.5 del tiempo de retención teórico
- C. — El 5.89 % del trazador obtenido pasa por el floculador después de 1.5 veces el tiempo de retención teórico debido a zonas de baja velocidad

Fig 6 Curva representativa de la concentración del trazador en el efluente para gastos de 8 a 9 lt/seg



- A.— El 9.61 % del trazador obtenido pasa por el floculador antes de transcurrir un tiempo igual o la mitad del de retención teórico; puede considerarse que es debido a los corto-circuitos
- B — El 82.65 % del total del trazador obtenido pasa por el floculador en un tiempo igual al de retención, después de transcurrido 0.5 del tiempo de retención teórico
- C — El 7.74 % del trazador obtenido pasa por el floculador después de 1.5 veces el tiempo de retención teórico debido a zonas de baja velocidad

Fig 7 Curva representativa de la concentración del trazador en el efluente para gastos de 11 a 12 lt/seg

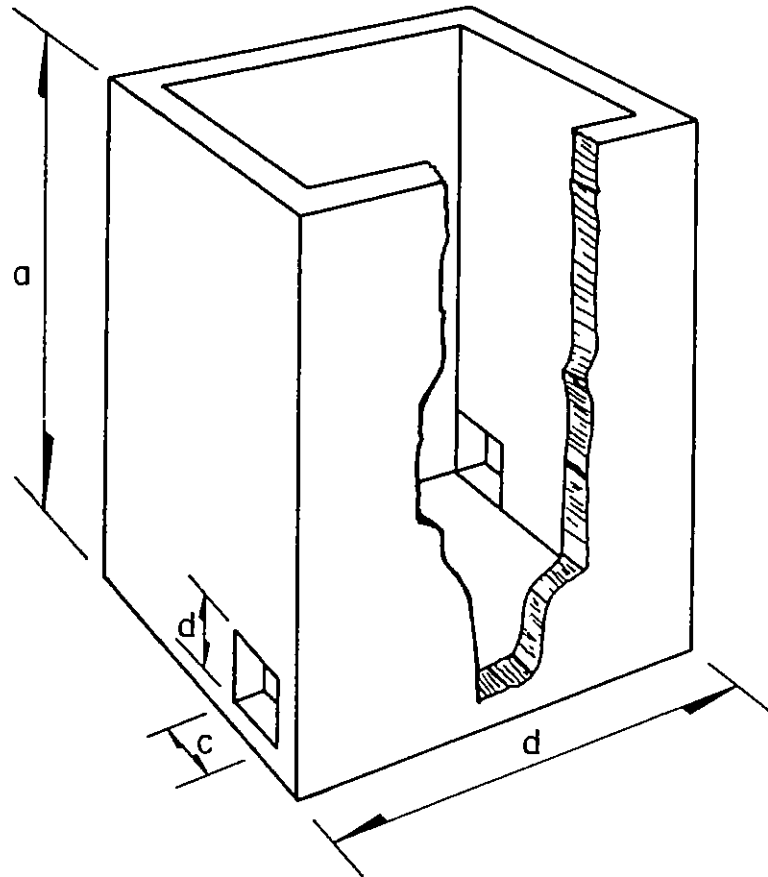


Fig 8 Relaciones geométricas de las celdas