

COMPORTAMIENTO FISICO DE SUSPENSION
DE PARTICULAS EN FLUJO ASCENDENTE

Proyecto de Tesis para obtener el Grado
de Ingeniero Sanitario

por

Ofelia Úmeres de del Aguila

en la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LIMA

PERU

1967

S U M A R I O

| | Pag. |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| Relación de valores tabulados | i v |
| Relación de Ilustraciones | v |
| Bibliografía | 4 2 |
| Capitulos | |
| Generalidades | |
| Razones del presente trabajo | |
| II Teoría general sobre Sedimentación | 4 |
| Comentarios | |
| Diferencias básicas en los dos tipos de escu <u>rrimiento.</u> | |
| Fórmulas y trabajos existentes sobre el pro <u>ceso de Sedimentación.</u> | |
| Factores físicos y químicos que intervienen | |
| III Mecánica de las partículas en suspensión, | 1 4 |
| Sedimentación de una partícula en forma aislada. | |
| Sedimentación de partículas que han formado un manto o aglomerado. | |
| Teoria existente. | |
| Comentarios a la fórmula a ser empleada en el presente trabajo. | 1 8 |
| IV Trabajos realizados en laboratorio | |
| Experimentos con partículas discretas. | 2 2 |
| Descripción del equipo usado. | |
| Material representativo. | |
| Datos y curvas obtenidos por observación. | |
| Curva obtenida por aplicación de la fórmula. | |

| | Pag. |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| Experimentos con partículas floculentas. | 3 0 |
| Descripción del equipo usado. | |
| Material representativo. | |
| Datos y curvas obtenidos por observación. | |
| Curvas obtenidas por aplicación de la fórmula. | |
| Método de Ecuaciones simultáneas | 3 6 |
| V Discusión de los resultados obtenidos | 3 8 |
| Confrontación con la teoría. | |
| Posibles razones para la variación entre lo observado y la teoría. | |
| VI Conclusiones. | 4 0 |

RELACION DE VALORES TABULADOS

Cuadro de viscosidades del agua

Resultados con partículas discretas

Zeolita ($h = 3.2$ cms)

Zeolita ($h = 2.7$ cms)

Arena ($h = 5.0$ cms)

Arena ($h = 7.0$ cms)

Resultados con partículas floculentas

Floes de Sulfato de Alumina con núcleo ($h=1.8$ cms)

Floes de Sulfato de Alumina sin núcleo ($h=2.2$ cms)

Floes de Sulfato de Alumina sin núcleo ($h=2.6$ cms)

Floes de Cloruro férrico ($h = 3.2$ cms)

Floes de Cloruro férrico ($h = 2.0$ cms)

CAPITULO

G E N E R A L I D A D E S

El proceso de sedimentación es de gran importancia en el tratamiento de aguas. En las plantas modernas se emplean actualmente dos tipos principales de tanques de sedimentación, el de flujo horizontal y los de flujo vertical.

Algunas ciudades actualmente por la estrechez de terreno están tendiendo a usar los clarificadores de flujo vertical, ya que estos a igualdad de cargas o cantidad de agua necesaria para un número dado de habitantes ocupan un menor espacio que los tanques de sedimentación convencionales, que precisan de áreas separadas para la mezcla, coagulación y sedimentación propiamente dicha.

Los tanques de flujo vertical en actual uso son casi todos con sistemas patentados, variando unos de otros en los implementos y distribución del flujo dentro del tanque mismo.

El agua en casi todos los tipos ingresa por el fondo y se desplaza verticalmente hacia arriba; este flujo ascendente es lento, inferior a la velocidad de sedimentación de las partículas para que estas no escapen con el efluente.

Debido a este lento fluir algunas partículas tienden a sedimentar, es decir recorren un camino opuesto al sentido del flujo; este ir de un lado y regresar del otro permite que las partículas tengan mayor oportunidad de contacto, pudiendo entonces si son floculentas juntarse, adquiriendo peso y por consiguiente mayor velocidad de sedimentación.

ción. Cuando las partículas han llegado a tener tal peso o tamaño que casi no se mueven con el flujo que se supone se mantenga constante, forman un colchon a través del cual el agua debe desplazarse.

Como no todas las partículas adquieren el mismo tamaño, algunas más pequeñas están en constante movimiento, esto es la causa de que el colchon o manto de partículas suspendidas actue como una malla donde toda impureza que trate de pasar quedará retenida, pero el continuo atrapamiento hará que el nivel de este crezca tanto y tan rápidamente como impurezas tenga el agua, llegando un momento en que escapará, pudiendo entonces obstruir los filtros. Para evitar esto es conveniente mantener el nivel de lodos a una altura y una concentración tal que permita que el flujo continúe con el gasto requerido.

El mantenimiento de este nivel es una de las mayores dificultades que se tienen en la operación de este tipo de tanques, pues no se puede conocer de antemano que altura tomará en un tiempo dado bajo condiciones estables de flujo y turbidez; peor aun si el flujo o la turbidez varían, como ocurre usualmente en los ríos de nuestra costa.

En Lima, hay en actual uso un conjunto de sedimentadores del tipo que estamos describiendo y se les llama "Pulsators" por el movimiento de pulsación que le da una bomba de vacío funcionando alternativamente. Estos tanques trabajan con bastante eficiencia para turbideces debajo de 1000 ppm que es en la mayor parte de tiempo hasta turbideces máximas de 2000 ppm. La turbidez en los ríos de nuestra costa llega

en algunas oportunidades en el verano hasta 35000 ppm habiendo llegado muy raras veces a sobrepasar este límite por lo que para poder usar este sistema se requiere necesariamente una sedimentación previa.

El nivel de lodos en época de escasa variación lo controlan cada dos horas por medio de una regla graduada con una botella en el extremo inferior, pero en época de verano debe ser constante y aun así cuando el caudal no ha sido regulado esta turbidez escapa y obstruye los filtros.

Como se ve, este sistema no sería recomendable salvo para aquellas ciudades que mantienen durante todo el año condiciones estables en el agua de ingreso a la planta.

Una ventaja que tendría el uso de estos tanques es como se dijo, el reducido espacio que ocupan por ser unidades compactas es decir tienen el proceso de mezcla, coagulación y sedimentación todo en un solo cuerpo; además debido a la poca preparación o acondicionamiento que necesita un agua para clarificarse, el tiempo de retención disminuye pudiendo doblar la carga que recibe.

Las dificultades enunciadas y el uso generalizado que podría darsele sugirió al " Centro de Investigaciones de Ingeniería Sanitaria, en el Perú la idea de un estudio que pudiera dar alguna luz sobre la forma en que se comportan las suspensiones de partículas bajo condiciones de flujo ascendente.

Ojalá el presente trabajo puede aclarar en alguna forma parte de las dudas que se tienen sobre este punto.

CAPITULO II

TEORIA GENERAL SOBRE SEDIMENTACION

Comentarios

La sedimentación es uno de los mas importantes procesos en el tratamiento de las aguas.

El agua es un elemento vital en el desarrollo del hombre y en casi todo ser viviente, le permite satisfacer sus necesidades primordiales; ayuda a la superación del individuo por el bienestar que proporciona.

El agua para ser usada por el humano necesita estar libre de gérmenes, no debe presentar olor, color o sabor que la hagan poco agradable para su uso y debe de estar libre de materias tóxicas que la hagan peligrosa.

Hace ya mucho tiempo el hombre ideó un sistema para mejorar la calidad de las aguas que habría de usar, este fué la decantación.

Para que una agua pueda decantar sus impurezas precisa de un almacenamiento más o menos prolongado.

Cuando el volumen o caudal de agua que se necesita es grande, el reservorio o cuenca para un almacenamiento tendría que ser también muy grande, existen zonas en que el espacio disponible para este fin es reducido, debido unas veces a que el desarrollo de la ciudad no deja -

un mayor espacio y en otras por que la zona en que podría ubicarse es de terreno accidentado.

Se ha logrado un efecto similar con mucho menos espacio usando un flujo continuo.

Los tanques de sedimentación actuales emplean - el sistema de flujo continuo bajo dos tipos fundamentales de escurrimiento.

- a) Tanques de flujo continuo con escurrimiento horizontal.
- b) Tanques de flujo continuo con escurrimiento vertical.

Diferencias básicas en los dos tipos de escurrimiento

Ambos tipos son diseñados para separar las partículas sólidas del agua, pero los principios bajo cuales ellos operan son diferentes:

Así, en los tanque de flujo vertical la clarificación se efectúa por atrapamiento de las impurezas en un manto de partículas coagulantes suspendidas a través del cual el agua necesariamente debe pasar, el agua en este tipo de tanque .ingresa por la parte inferior generalmente a través de una tubería, se desplaza en flujo ascendente y es recolectada superficialmente por vertimiento libre.

En los tanques de flujo horizontal la clarificación tiene lugar debido al efecto de la fuerza de la gravedad sobre las partículas que a causa de la reducida velocidad de circulación permite que estas se asienten en función de su propio peso.

El agua en estos tipos de tanques generalmente ingresa por un lado del tanque en la superficie y es recolectada en el extremo opuesto también en la superficie.

Casi siempre a una distancia relativamente corta de la entrada misma, se colocan paredes difusoras que tienden a uniformizar el flujo a través de toda la sección transversal del tanque.

Los gráficos 1 y 2 dan una idea más clara sobre la forma como ésto ocurre.

Formulas y trabajos existentes sobre el proceso de Sedimentación.

Como ya se dijo anteriormente, en la acción de sedimentar, es la fuerza de la gravedad la que permite que las impurezas suspendidas caigan y descansen en el fondo. La fuerza que esta puede ejercer sobre las partículas es función del tamaño de ésta', de su forma, densidad con respecto al líquido en el cual se desplazan y de la viscosidad en si de dicho líquido que es a su vez función de la temperatura.

Para el caso de la sedimentación deben establecerse dos clases de partículas:

Aquellas que mantienen su individualidad a través del proceso, no son floculentas es decir no se aglomeran ni compactan, por lo tanto mantienen una velocidad constante de sedimentación y se les conoce como partículas discretas. Pertenecen a este tipo las partículas granulares como arena, sílice, sales etc.

Las partículas que en su desplazamiento se aglomeran variando en tamaño y forma y por consiguiente en velocidad de sedimentación se llaman partículas floculentas.

La forma de eliminar a uno u otro tipo de partículas varía, así la eliminación de las partículas discretas se consigue por reducción de la velocidad del líquido que las contiene, es el sistema empleado en los desarenadores y es aplicable para partículas relativamente grandes.

Cuando las partículas están finalmente divididas sedimentan lentamente y es casi imposible que lo hagan por su propio peso, en función de la velocidad del líquido, tal es el caso de la arcilla que dá turbidez a las aguas. Para lograr que lo hagan precisan de la ayuda de un coagulante.

Las partículas floculentas naturales como las que existen en los desagües, que son residuos de materia orgánica, pueden aglutinarse unas con otras ya que carecen de cargas eléctricas en su superficie que son las que evitan los contactos.

Newton₁ y Stoke₂ llegaron a una relación cuantitativa que podía predecir la velocidad de sedimentación de una partícula discreta cayendo libremente en un líquido.

Así la ley de Stoke dice:

$$v_s = \frac{g}{18} \cdot \frac{S_1 - 1}{\mu} \cdot d^2$$

El primer factor es constante $\left(\frac{g}{18}\right)$

El segundo factor puede decirse que es una constante para un material y temperatura definidos.

De donde se establece que la velocidad de sedimentación de una partícula es proporcional al cuadrado de su diámetro, es decir a mayor tamaño mayor velocidad de sedimentación; pero esto solo tiene validez hasta ciertos límites y siempre que se considere al movimiento de circulación del líquido alrededor de la partícula como laminar. (El número de Reynolds₃ debe ser menor de 1).

Algunas partículas producen con su caída un movimiento turbulento y sedimentan siguiendo la Ley de Newton que dice:

$$v_s = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \cdot S_1 - 1 \cdot d}$$

Esto para el caso de partículas esféricas.

Es decir la velocidad de sedimentación es función del diámetro elevado a la potencia $\frac{1}{2}$.

Los granulos de arena y floculos pesados sedimentan en una zona de transición con intervalo del N. de Reynolds de 1 a 2000.

Las partículas discretas menores que normalmente se remueven en plantas de tratamiento se rigen a la Ley de Stoke.

Allen Hazen₄ estudió el comportamiento de la partícula discreta en el acto de sedimentar y la trayectoria que sigue al hacerlo.

Basó su teoría en ciertas suposiciones que no siempre se cumplen,

a) La velocidad de desplazamiento del agua es la misma en cualquier punto del tanque.

b) Cuando una partícula alcanza el fondo, permanece en reposo y queda eliminada.

c) Todas las partículas iguales tienen la misma velocidad de sedimentación.

Dedujo del comportamiento de dichas partículas que la remoción de ellas son una función de la carga superficial y no del tiempo de retención.

T.R. Camp⁵. posteriormente basado en este mismo principio dedujo que esto, también es válido para partículas floculentas.

Según definiciones, carga superficial es la cantidad de flujo por unidad de superficie que soporta un tanque, esto es:

$$\text{Carga superficial} = Q/A$$

y puede ser expresado en $m^3 / m^2/\text{día}$ en el sistema decimal o en $M.G.D./\text{acre}/\text{día}$ en el sistema inglés; se emplea también $gls/\text{día}/\text{pie}^2$.

Si decimos que tiempo de retención de un tanque es el tiempo que éste tanque, conserva un volumen de agua dado bajo condiciones de flujo Q . tenemos que:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\text{Volumen del tanque}}{\text{Gasto}} \quad (1)$$

Pero volumen = Área superficial x profundidad

$$\text{o sea } V = A \times h \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1) tenemos:

$$t = \frac{A \times h}{Q} \quad (3)$$

Si decimos que t_0 es el tiempo que demora una partícula en alcanzar el fondo a una velocidad de sedimentación v_s podemos escribir lo siguiente:

$$t_0 = \frac{h}{v_s} \quad (\text{donde "h" es la profundidad del tanque.})$$

Relacionando el tiempo de retención al tiempo que demora una partícula en alcanzar el fondo, tenemos:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{A \times h}{Q \times h / v_s} = \frac{A \times v_s}{Q}$$

De donde puede establecerse que " el rendimiento de un tanque de sedimentación es independiente de la profundidad, proporcional al área superficial y velocidad de sedimentación de la partícula e inversamente proporcional al gasto Q ".

La teoría de sedimentación aplicada a un tanque ideal de flujo horizontal para partículas discretas indica que todas aquellas cuya velocidad de sedimentación es igual o mayor a la velocidad equivalente de la carga superficial en el tanque deberían ser eliminadas.

Trayectorias idealizadas de asentamiento de partículas en tanques de flujo horizontal se ilustran en las figuras 3 y 4.

Sin embargo las partículas que se remueven en tanques convencionales son partículas floculentas y su comportamiento dista mucho de ser tal cual se ha enunciado. Además la velocidad del agua en la zona dispuesta para sedimentar no es uniforme, siendo menor en el fondo y lados y teniendo un máximo valor cerca del centro del tanque y más hacia la superficie que al fondo.

Es decir factores de coagulación y de velocidad alteran el normal funcionamiento de la sedimentación produciendo corrientes parásitas que generan una ligera turbulencia, a causa de esta turbulencia unas partículas llegaran al fondo mas rápido que si no hubiera turbulencia y otras saldrán fuera en el efluente pues este movimiento es el causante de la difusión de partículas hacia arriba y hacia abajo en surcos manteniendo su misma velocidad de asentamiento

Factores físicos y químicos que intervienen en la clarificación de las aguas.

Muchos son los factores que intervienen retardando o acelerando el proceso de clarificación de las aguas.

El más importante de todos es la temperatura, ya que influencia grandemente la densidad de las aguas y da lugar a corrientes de reversión y convección que pueden afectar las propiedades sanitarias de las aguas en ciertas estaciones, arrastrando hacia la superficie los precipitados finos o ligeros y reduciendo de esa forma la eficiencia del proceso.

La densidad del agua puede ser expresada en:

- a) densidad masa (ρ) o masa por unidad de volumen m/l^3 -
- b) peso específico (γ) o peso por unidad de volumen.

VALORES DE LA DENSIDAD Y VISCOSIDADES DEL AGUA PARA
 VARIAS TEMPERATURAS (7)

CUADRO 1

| Temperatura °C | Densidad grm/cm ³ | Viscosidad absoluta(ρ) | Viscosidad cinemática (μ) |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 0° | 0.99987 | 1.7921 | 1.7923 |
| 5° | 0.99999 | 1.5188 | 1.5188 |
| 10° | 0.99973 | 1.3097 | 1.3101 |
| 15° | 0.99913 | 1.1447 | 1.1457 |
| 20° | 0.99823 | 1.0087 | 1.0105 |
| 25° | 0.99707 | 0.8949 | 0.8975 |
| 30° | 0.99568 | 0.8004 | 0.8039 |
| 35° | 0.99406 | 0.7208 | 0.7251 |

Nota. La viscosidad cinemática es la que interviene en el cálculo de la velocidad de sedimentación en la Ley de Stokes.

Otras de las cualidades propias de las impurezas presentes en las aguas y que podrían afectar el proceso son:

Adsorción o propiedad de ciertas sustancias de conservar en su superficie a otras y son dependientes de su tipo, temperatura y concentración.

Hidratación o liofobilidad que es la tendencia de ciertas partículas a fijar mantos de agua alrededor de ellas. Esta capa hace mas difícil la coagulación o agrupación de partículas coloidales.

El potencial " Zeta " considerado como la capacidad de atraer o repeler cargas eléctricas a una determinada distancia desde la superficie de la partícula

Las fuerzas de Van der Waals o de gravitación universal que dice: dos materias se atraen en razón directa del producto de sus masas y en razón inversa del cuadrado de su distancia .

Además podemos considerar al movimiento Browniano como un factor de agitación de tipo térmico que se produce por la acción de los choques moleculares entre las sustancias en solución y las partículas coloidales.

CAPITULO III

MECANICA DE LAS PARTICULAS EN SUSPENSION

Sedimentación de una partícula en forma aislada

Cuando una partícula cae en un líquido, su velocidad de sedimentación está sujeta a la viscosidad del líquido en oposición a la fuerza de la gravedad.

La partícula al caer desplaza el líquido debajo de ella y este fluye alrededor y hacia arriba con una velocidad llamada velocidad interpartícula.

La partícula en el instante mismo de comenzar su caída lo hace con un movimiento uniformemente acelerado pero este rápidamente en función de la velocidad hacia arriba que le hace resistencia es anulado y entonces la partícula cae a velocidad constante conociéndose a esta como velocidad de sedimentación.

Como la igualación de las dos fuerzas o velocidades es instantánea puede considerarse a la velocidad de caída como constante para un determinado tipo de partícula.

Analizando esto en forma más detallada y aplicándola a partículas discretas podemos decir:

Si una partícula de área transversal " A_p " es confiada en un tubo de área transversal " A_t " solamente parte del área del tubo estará libre para el pasaje del agua alrededor de la partícula. Desde que " v_s " es una caracterísg

tica que no cambia y considerando que la partícula está en equilibrio en la suspensión, es decir la velocidad de sedimentación es en este momento igual a la velocidad relativa del flujo hacia arriba podemos escribir que:

$$v_r = v_s$$

Pero " v_s " a su vez debe ser igual a " v_a " velocidad de aproximación o carga superficial en el límite para que ésta no escape.

Asumiendo que la carga superficial se mantiene constante e igual en cualquier plano del tubo tenemos considerando dos planos, uno dentro de la suspensión y otro fuera de ésta que:

$$v_r (A_t - A_p) = v_a \cdot A_t$$

De la simple observación de esta fórmula podemos ver que " v_a " siempre será menor que " v_r " pero como " v_r " es igual a " v_s " la velocidad de aproximación sobre la partícula aún en el límite supuesto siempre será menor a su velocidad de inmersión.

Sedimentación de partículas que han formado un manto

Si en vez de considerar una sola partícula consideramos un grupo de partículas de las mismas características anteriores, para la misma sección transversal de tubería " A_t " el área disponible para el pasaje del agua será aún menor.

Como ya dedujimos anteriormente la velocidad del flujo relativo a las partículas considerado en su valor límite será también en este caso menor que la velocidad de inmersión del conjunto.

Teoría existente

Existe poca información que pudiera dar una idea mas clara sobre este aspecto.

El ingeniero australiano A.N. Bondg hizo una deducción basándose en un cubo de lado "l" a través del cual fluye verticalmente un líquido. El supuso que habían "n" bolas de diámetro "D" iguales ordenadas a lo largo de cada lado.

Así, si consideramos un plano horizontal habrían $(n \cdot D) \times (n \cdot D)$ partículas o sean $n^2 D^2$ área de partículas multiplicado por un factor "f" propio de la forma de las partículas.

Si consideramos que $f_1 n^3 D^3$ es el volumen de tales partículas para un volumen del cubo igual a "l³" tendremos que la concentración será expresada en la siguiente forma:

$$s = \frac{f_1 n^3 D^3}{l^3} \quad (1)$$

Suponiendo que el agua fluye a través de este volumen y considerando un plano cualquiera, uno debajo de la suspensión y otro en medio de esta, podemos escribir que:

$$v_a l^2 = v_r (l^2 - f n^2 D^2)$$

Bond para llegar a su relacion despeja de la siguiente manera.

$$v_a = v_r \left(\frac{1 - f n^2 D^2}{l^2} \right)$$

El dice que $\frac{n^2 D^2}{l^2} = \left(\frac{n^2 D^2}{l^3} \right)^{2/3} = s^{2/3}$

o sea

$$v_a = v_r \left(1 - f_2 s^{2/3} \right)$$

Basado en esta fórmula hace ciertas suposiciones que las comenta en su artículo.

A.A. Kalinske₉ y N. J. R. Schaafsma₁₀ llegaron a conclusiones similares pero ni uno ni otro consideró el exponente 2/3 a la concentración.

PARTICULAS EN SUSPENSIÓN

FIGURA 5

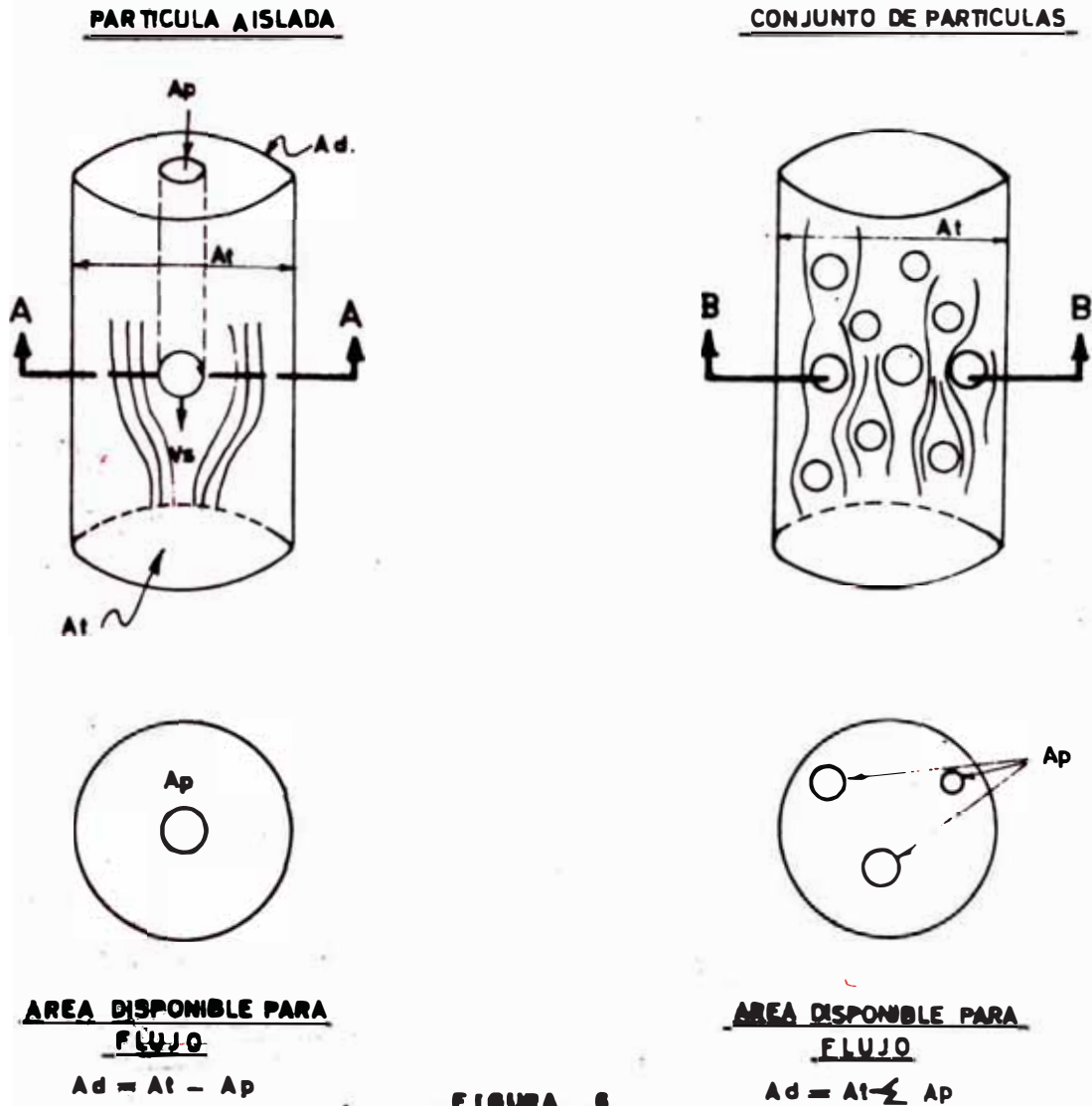
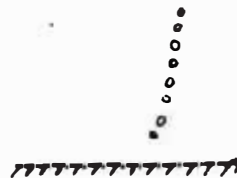


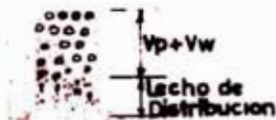
FIGURA 6

DIBUJO ESQUEMATICO REPRESENTATIVO DEL EQUIPO USADO EN LABORATORIO

Tubo de Pruebas



2. Siphon Marnot



Comentario a la fórmula a ser empleada en el presente trabajo.-

Anteriormente comentamos sobre el trabajo realizado por el Ingeniero Bond en la sedimentación de suspensión de partículas; él realizó sus pruebas en aguas quietas, es decir lo que se desplazaba hacía abajo era la partícula o suspensión de partículas; el líquido fluía al rededor de ellas por efecto de la caída.

Dijimos también que el Ingeniero Schaafsma llegó a una conclusión similar pero sin considerar el exponente $2/3$ a la concentración de partículas.

El dice que la velocidad de sedimentación de una suspensión, es función de la velocidad de sedimentación de una partícula en forma aislada y decrece conforme la concentración de partículas en dicha suspensión aumenta.

Su fórmula es la siguiente:

$$v_a = v_s (1 - ms)$$

Siendo

v_a ... velocidad de sedimentación de la suspensión

v_s ... velocidad de sedimentación de una partícula

m ... una constante

s ... la concentración de partículas existentes

Esta fórmula también fué desarrollada considerando la sedimentación de una suspensión de partículas en aguas

tranquilas.

Los ingenieros Brown y Navarro₁₁ han considerado este tipo de problema pero suponiendo que lo que se mueve es el líquido y no la suspensión de partículas, que es como realmente ocurre en las Plantas que emplean flujo vertical para clarificación de las aguas.

Desde el punto de vista relativo a las partículas, puede decirse que es lo mismo que las partículas se muevan mientras el líquido permanece tranquilo o que el líquido fluya al rededor de ellas mientras estas no se mueven.

La fórmula que han presentado es la siguiente:

$$v_r = v_a \cdot \frac{V_p + V_w}{V_w} \quad (1)$$

donde:

V_w ... es el volumen de agua que existe entre las partículas en suspensión.

V_p ... es el volumen sólido de dichas partículas.

Esta fórmula es fácil de deducir, si decimos que velocidad relativa a las partículas, es la velocidad que se consigue por el pasaje del agua a través de los espacios libres entre ellas (Fig. 5).

En una suspensión de volumen total ($V_p + V_w$) si V_p es el volumen sólido de partículas, la concentración "s" existente de partículas en dicho volumen estará dado por la relación siguiente:

$$s = \frac{V_p}{V_w + V_p}$$

De acuerdo a la deducción anterior podemos escribir:

$$v_r = \frac{v_a}{1-s} \quad (2) \quad \text{ó también} \quad v_r = \frac{v_a}{1 - \frac{V_p}{V_w + V_p}}$$

que ordenada y simplificada reproduce la ecuación (1)

Si en la ecuación (2) despejamos " v_a " tenemos:

$$v_a = v_r (1 - s) \quad (3)$$

Si comparamos la fórmula (3) con la del Ingeniero Schaafsma veremos que es similar, faltando solo la constante "m" antes de la concentración.

Este valor de "m" se ha colocado por ser difícil de medir la concentración, excepto por métodos indirectos. Los valores que se obtienen generalmente son correctos desde un punto de vista relativo y entonces es necesario multiplicarlos por un factor "m" que nos permite el equilibrio entre la concentración relativa y la concentración real o efectiva.

Para comparar los resultados observados en el Laboratorio con una fórmula matemática que nos permita para un valor dado de v_a hallar el correspondiente a la expansión relativa de la suspensión o conociendo la expansión máxima - que nos conviene, determinar el máximo valor de v_a , usare -

mos la fórmula de Brown y Navarro que no emplea la constante " m " pues en este caso se asume que los valores tanto para V_p como para V_w son correctos.

El método usado para conocer V_p y V_w partiendo de los resultados experimentales se explica detalladamente al final del IV Capítulo.

Para las pruebas de Laboratorio, se tratará de reproducir tanto como sea posible las condiciones supuestas en el desarrollo de la fórmula.

CAPITULO IV

TRABAJOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Experimentos con partículas discretasDescripción del equipo usado.-

El equipo que se empleó, fueron tuberías tranpa - rentes representativas del cuerpo del sedimentador, de lados paralelos y de dos diámetros diferentes, lo que nos permitía tener dos áreas transversales también diferentes y estudiar la influencia que pudieran tener la mayor o menor distancia entre paredes sobre la altura de la expansión.

Los diámetros escogidos fueron de 1.1 cms y de 5.0 cms lo que nos daba secciones de 0.945 cm^2 y 1965 cm^2 respectivamente.

La entrada del agua se hizo a través de una porción de tubería colocada dentro de un tapón que servía de fondo y en cada caso de diámetro menor al usado como representativo del tanque.

El sistema que se usó para conseguir una presión uniforme y un flujo regular fué empleando una botella tipo sifón Mariott.

Se unió el extremo del sifón con el fondo del tanque con una porción de manguera de jebe, la que cerca a la entrada del tanque representativo tenía un interruptor de presión regulable, que nos permitía conseguir el flujo deseado.

Para determinar este flujo, se conectó en la parte superior otro tapón de condiciones similares al de la entrada y por medio de una manguera se recibía el efluente en una probeta graduada tomando el tiempo que demoraba en alcanzar una altura determinada.

Para evitar que el flujo saliera en un solo golpe dando lugar a cortos circuitos se preparó un fondo de distribución con piedrecitas de diferentes tamaños ordenadas de mayor a menor y en sentido de abajo hacía arriba.

Se incluye un dibujo esquemático que dará idea de lo que se ha expuesto.

MATERIAL REPRESENTATIVO

El material que se escogió como representativo de las partículas discretas, fué una zeolita ya agotada, es decir sin fuerza para el intercambio iónico; de color amarillo, con diámetros de 0.59 mm. a 0.42 mm. (pasaban la malla # 30 pero quedaban retenidas en la malla # 40) y de densidad 1.11 obtenida por relación peso sobre volumen desplazado.

Una particularidad de este material, fué que estando seco ocupaba un determinado volumen, pero conforme se humedecía aumentaba de volumen relativo, es decir el espacio entre partículas se incrementaba. La forma y diámetro de la partícula no variaba, esto pudo comprobarse con el uso del microscopio,. Una posible causa de esto se supone que sea la presencia de cargas eléctricas iguales en la superficie del material que solo se ponen en manifiesto en presencia del agua.

Como una forma de comparar la influencia que pudiera tenerla mayor o menor densidad de una partícula discreta en la variación de la expansión del conjunto se hicieron también pruebas con arena, de densidad 2.65 siendo los diámetros de las partículas empleadas de 0.149 mm.

a 0.210 mm. en una prueba y de 0.59 mm en la otra prueba.

a).- Los valores indicados como observados en el laboratorio se consiguieron, colocando una cinta graduada en cima del tubo de pruebas; se leía la expansión que alcanzaba bajo un flujo determinado y se anotaban estos valores, luego se hacía variar el flujo por medio del interruptor de presión regulable y se volvía a anotar los nuevos valores leídos, tanto para expansión como para el flujo así sucesivamente.

b).- Los valores indicados bajo el título " obtenido con el empleo de la fórmula " se hallaron usando el sistema de ecuaciones simultáneas, lo mismo que los valores de " V_p y v_r

Todo este último proceso se explicará detalladamente con un ejemplo al final del presente capítulo.

Ira. Prueba (Lámina # 3)

Material empleado..... zeolita (densidad .. 1.11)

Diámetro de la partícula..... de 0.42 mm. a 0.59 mm.

Diámetro de tubería..... 1.1 cms.

Area de la sección..... 0.945 cm²Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) ... 3.2 cms.Datos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg.) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| 3.2 | 1.0 | 0.00 | 0.00 |
| 4.3 | 1.34 | 0.088 | 0.093 |
| 6.0 | 1.87 | 0.233 | 0.246 |
| 7.1 | 2.22 | 0.313 | 0.353 |
| 9.0 | 2.82 | 0.455 | 0.480 |
| 13.9 | 4.35 | 0.627 | 0.662 |
| 14.9 | 4.65 | 0.627 | 0.662 |

Datos obtenidos por la fórmula.

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg.) |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.5 | 0.134 |
| (x) 1.65 | 0.200 |
| 2.0 | 0.316 |
| (x) 2.65 | 0.450 |
| 3.0 | 0.497 |
| 4.15 | 0.598 |

Valor obtenido para V_p 1.266Velocidad relativa calculada $v_p = v_s$ 0.86 cm/seg.

2da. Prueba (Lámina # 3)

Material empleado zeolita (densidad ..1.11)

Diámetro de la partícula.... de 0.42 mm. a 0.59 mm.

Diámetro de tubería..... 5.0 cms.

Area de la sección 19.65 cm²Altura inicial manto ($V_p + V_w$) 2.7 cms.

Datos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg.) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| 2.7 | 1.0 | 0.00 | 0.00 |
| 4.6 | 1.7 | 4.74 | 0.240 |
| 7.0 | 2.6 | 9.10 | 0.463 |
| 7.8 | 2.89 | 9.82 | 0.500 |
| 10.6 | 3.93 | 12.50 | 0.637 |

Datos obtenidos por la fórmula

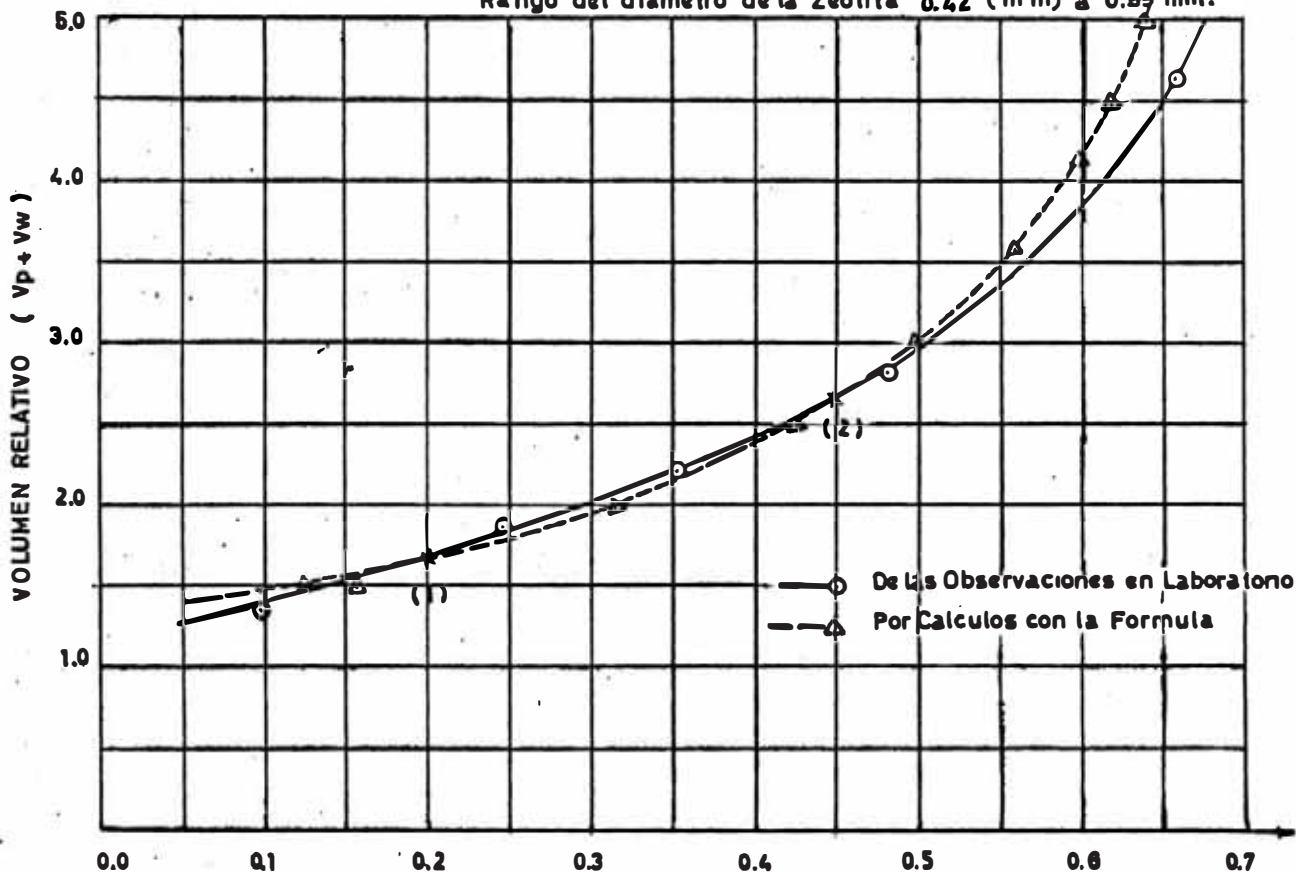
| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.5 | 0.166 |
| (x) 1.7 | 0.250 |
| 2.0 | 0.345 |
| 2.5 | 0.452 |
| (x) 3.0 | 0.525 |
| 3.5 | 0.578 |
| 4.0 | 0.617 |

Valor obtenido para V_p 1.218Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ 0.885 cm/seg.

1ª PRUEBA

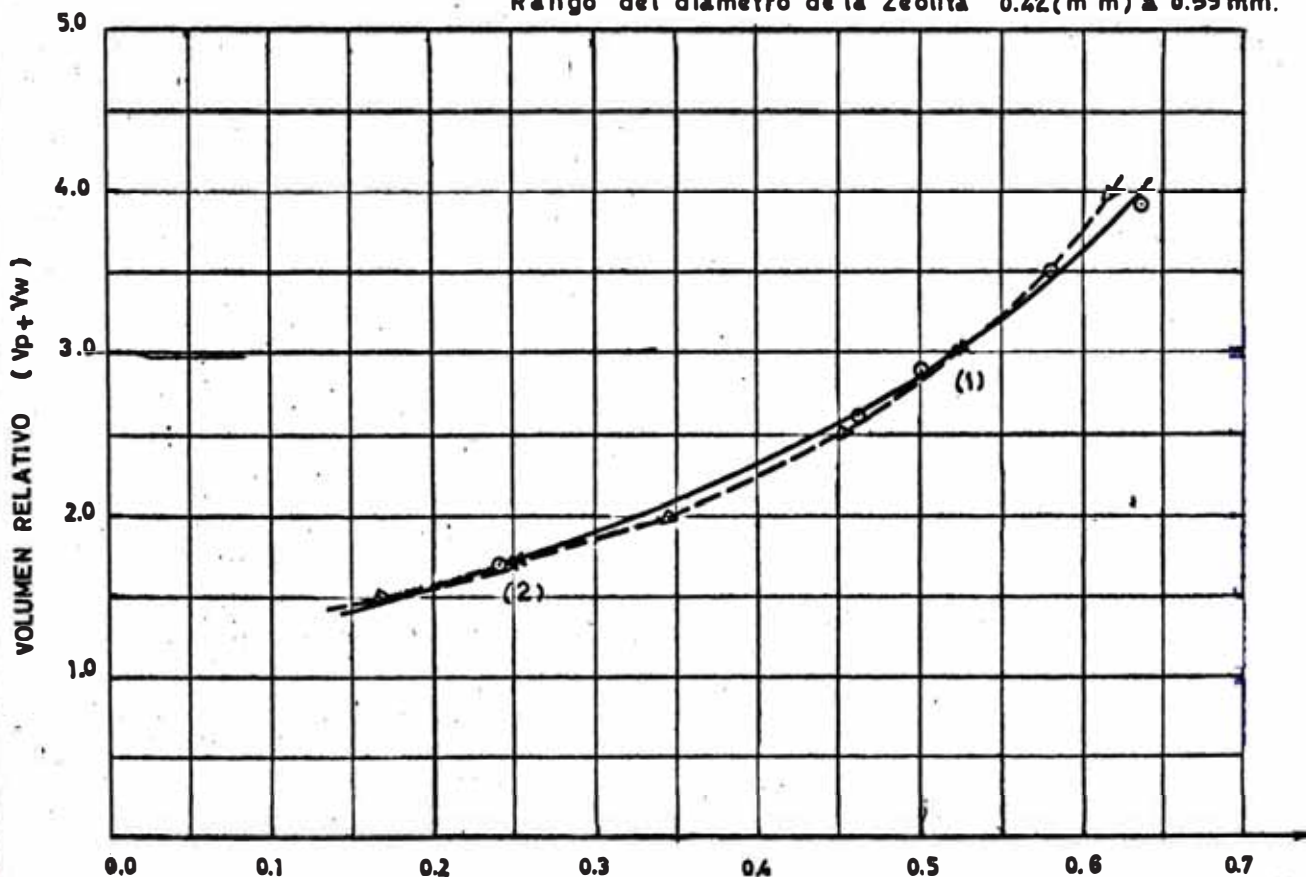
Lamina N° 3

Zeolita (h = 3.2 cms)
 Area transversal = 0.945 cm²
 Densidad de Zeolita 1.11
 Rango del diámetro de la Zeolita 0.42 (mm) a 0.59 mm.



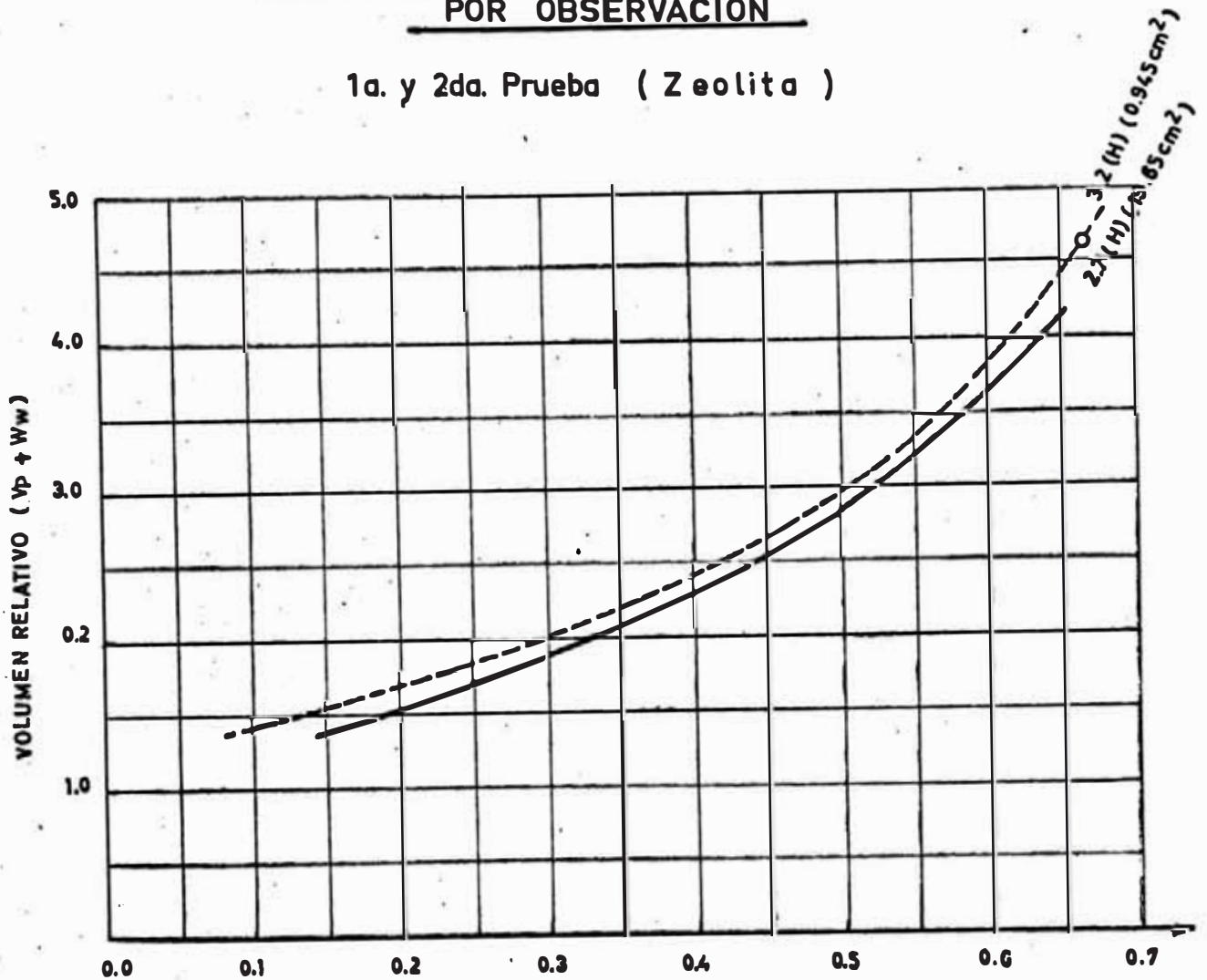
2da. PRUEBA

Zeolita (h 2.7 cms)
 Area transversal = 19.65 cm²
 Densidad de la Zeolita = 1.11
 Rango del diámetro de la Zeolita 0.42 (mm) a 0.59 mm.



COMPARACION DE LAS CURVAS OBTENIDAS
POR OBSERVACION

1a. y 2da. Prueba (Zeolita)



3ra. Prueba (lámina # 5)

Material empleado arena (densidad 2.65)

Diámetro de la partícula 0.149 mm. a 0.210 mm.

Diámetro de tubería..... 1.1 cms.

Area de la sección..... 0.945 cm²Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 5.0 cms.Datos obtenidos por observación.

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo ml/seg | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------|
| 5.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5.0 | 1.0 | 0.033 | 0.035 |
| 5.7 | 1.14 | 0.103 | 0.110 |
| 7.1 | 1.42 | 0.254 | 0.268 |
| 7.6 | 1.52 | 0.360 | 0.382 |
| 10.8 | 2.16 | 0.582 | 0.620 |
| 15.3 | 3.05 | 0.835 | 0.885 |

Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.1 | 0.042 |
| (x) 1.25 | 0.200 |
| 2.0 | 0.635 |
| 2.5 | 0.780 |
| (x) 3.0 | 0.880 |
| 4.0 | 1.000 |

Valor obtenido para V_p 1.066Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ 1.36 cm/seg

4ta. Prueba (Lámina # 5)

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Material empleado | arena (densidad ... 2.65) |
| Diámetro de la partícula | 0.59 mm |
| Diámetro de tubería..... | 1.1 cm |
| Area de la sección..... | 0.945 cm ² |
| Altura inicial ($V_p + V_w$) | 7.0 cms |

Datos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 7.0 | 1.0 | 0.25 | 0.265 |
| 7.2 | 1.03 | 0.50 | 0.530 |
| 8.2 | 1.17 | 1.10 | 1.165 |
| 9.5 | 1.36 | 1.67 | 1.770 |
| 11.9 | 1.70 | 2.60 | 2.760 |
| 14.4 | 2.06 | 3.46 | 3.660 |
| 15.5 | 2.22 | 3.73 | 3.950 |

Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.1 | 0.695 |
| (x) 1.2 | 1.200 |
| 1.4 | 2.000 |
| (x) 1.7 | 2.820 |
| 1.8 | 3.050 |

Valor obtenido para V_p 0.987

Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ 6.75 cm/seg

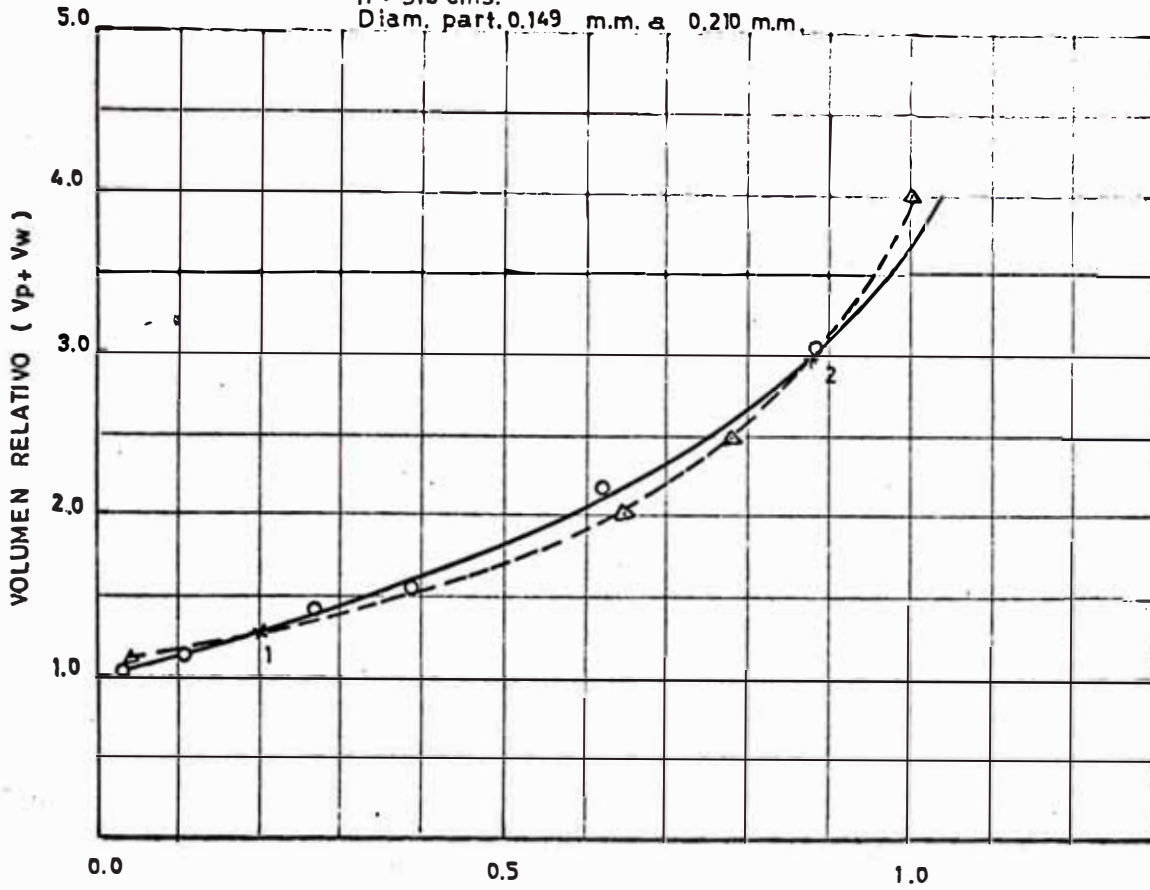
3ª PRUEBA

Arena = 2.65

Area transversal = 0.945 cm²

h = 5.0 cms.

Diam. part. 0.149 m.m. a 0.210 m.m.



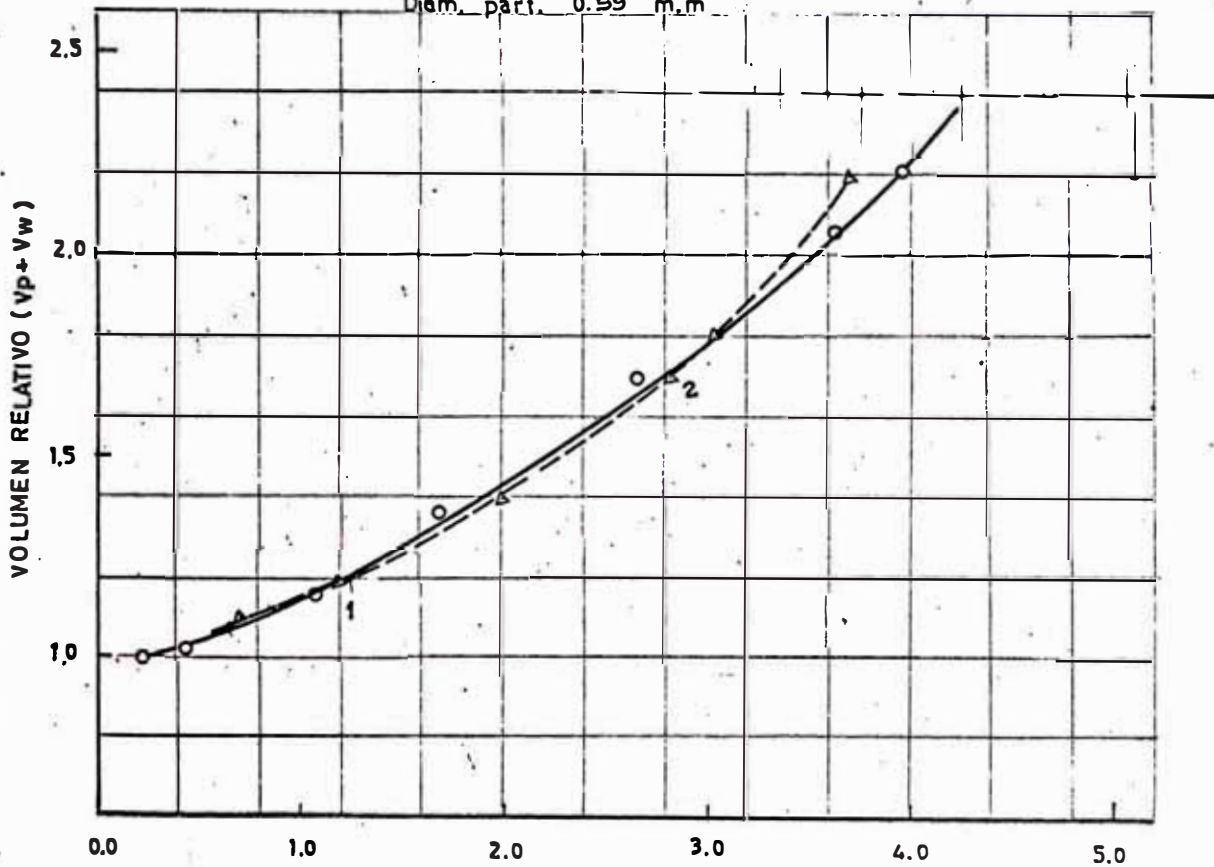
4ª ETAPA

Arena = D=2.65

Area transversal 0.945 cm²

h = 7.0 cms

Diam. part. 0.59 m.m



EXPERIMENTOS CON PARTICULAS FLOCULENTAS

Equipo usado.- Es el mismo que se empleó para las pruebas de partículas discretas, es decir: un tubo representativo del cuerpo del sedimentador conectado a una botella Marriot para regular el flujo, un interruptor de presión regulable a la entrada para conseguir las diversas velocidades del agua, una probeta graduada y un cronómetro.

Material representativo.- Para las pruebas con partículas - floculantes se usaron dos sustancias que daban floes de diferente calidad.

Una de ellas fué "Sulfato de Alúmina" preparado en la siguiente forma: 1.5 ml de este material en solución al 34.2% en peso se unió a 1. ml de hidroxido de Sodio al 3% también en peso mezclándose todo en un litro de agua corriente. Con estos compuestos se obtenía 2 cms de altura para el manto de lodos o floes.

La otra sustancia, fué "Cloruro Ferrico" usándose 4 ml de solución al 3% por 1 ml de hidroxido de Sodio - también al 3% todo mezclado en $\frac{1}{2}$ litro de agua. La altura de floes que se consiguió en esta forma fué de 1 cm.

Para mayores alturas necesarias, se repetirán varias veces las cantidades indicadas.

La calidad del agua usada fué la siguiente::

Alcalinidad 200 ppm como CaCO_3

Dureza..... 400 ppm "

Ph..... 7.3

Temperatura..... 27°C

Una vez formado los floes se tomó el Ph del - agua que los contenía y en ambos casos dió 7.1 sensiblemente igual al agua de entrada por lo que puede decirse que esta no hacía variar los floes ya formados.

Ira. Prueba (Lámina # 6)Material empleado ... ~~Flores~~ de Sulfato de Alúmina (con nucleo)

Diámetro de tubería..... 5.0 cms.

Area de la sección..... 19.65 cm²Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 1.8 cmsDatos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 1.8 | 1.0 | 0.00 | 0.00 |
| 2.1 | 1.17 | 0.187 | 0.0096 |
| 3.0 | 1.67 | 0.759 | 0.0388 |
| 3.2 | 1.78 | 1.250 | 0.064 |
| 4.3 | 2.38 | 1.560 | 0.080 |
| 6.1 | 3.40 | 1.920 | 0.098 |

Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.3 | 0.020 |
| (x) 1.5 | 0.039 |
| 2.0 | 0.0692 |
| (x) 3.0 | 0.1000 |
| 4.0 | 0.115 |

Valor obtenido para V_p 1.138Velocidad relativa calculada $v_p = v_s$ 0.161 cm/seg

2da. Prueba (Lámina # 6)

Material empleado floes de Sulfato de Alúmina sin nucleo
 Diámetro de tubería..... 5.0 cms.
 Area de la sección..... 19.65 cm²
 Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 2.2 cms

Datos obtenidos por observación.

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 2.2 | 1.0 | 0.000 | 0.000 |
| 2.2 | 1.0 | 0.093 | 0.0048 |
| 2.5 | 1.14 | 0.200 | 0.0102 |
| 2.8 | 1.27 | 0.558 | 0.0284 |
| 3.5 | 1.59 | 0.865 | 0.0440 |
| 4.8 | 2.18 | 1.220 | 0.0625 |
| 6.0 | 2.73 | 1.470 | 0.0750 |
| 7.0 | 3.18 | 1.790 | 0.0915 |
| 9.0 | 4.10 | 2.080 | 0.1060 |
| 10.0 | 4.55 | 2.360 | 0.1180 |

Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.5 | 0.0276 |
| (x) 1.85 | 0.0500 |
| 2.25 | 0.0677 |
| 2.75 | 0.0827 |
| (x) 3.50 | 0.0970 |
| 4.00 | 0.1040 |
| 5.00 | 0.1130 |

Valor obtenido para V_p 1.233

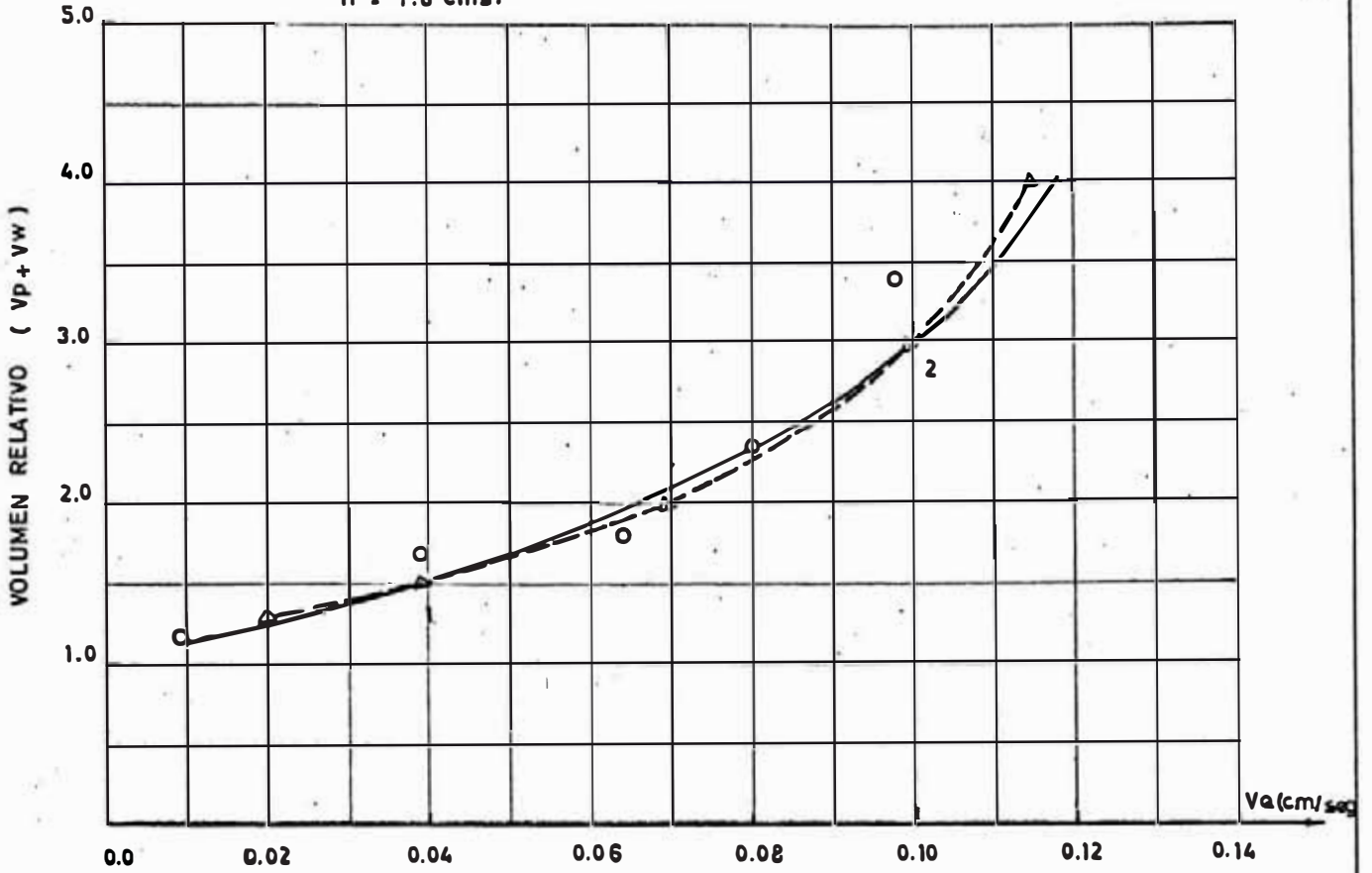
Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ 0.15 cm/seg

1ª PRUEBA

Flocs de sulfato de Alumina con nucleo

Area transversal 19.6 cms²

h = 1.8 cms.

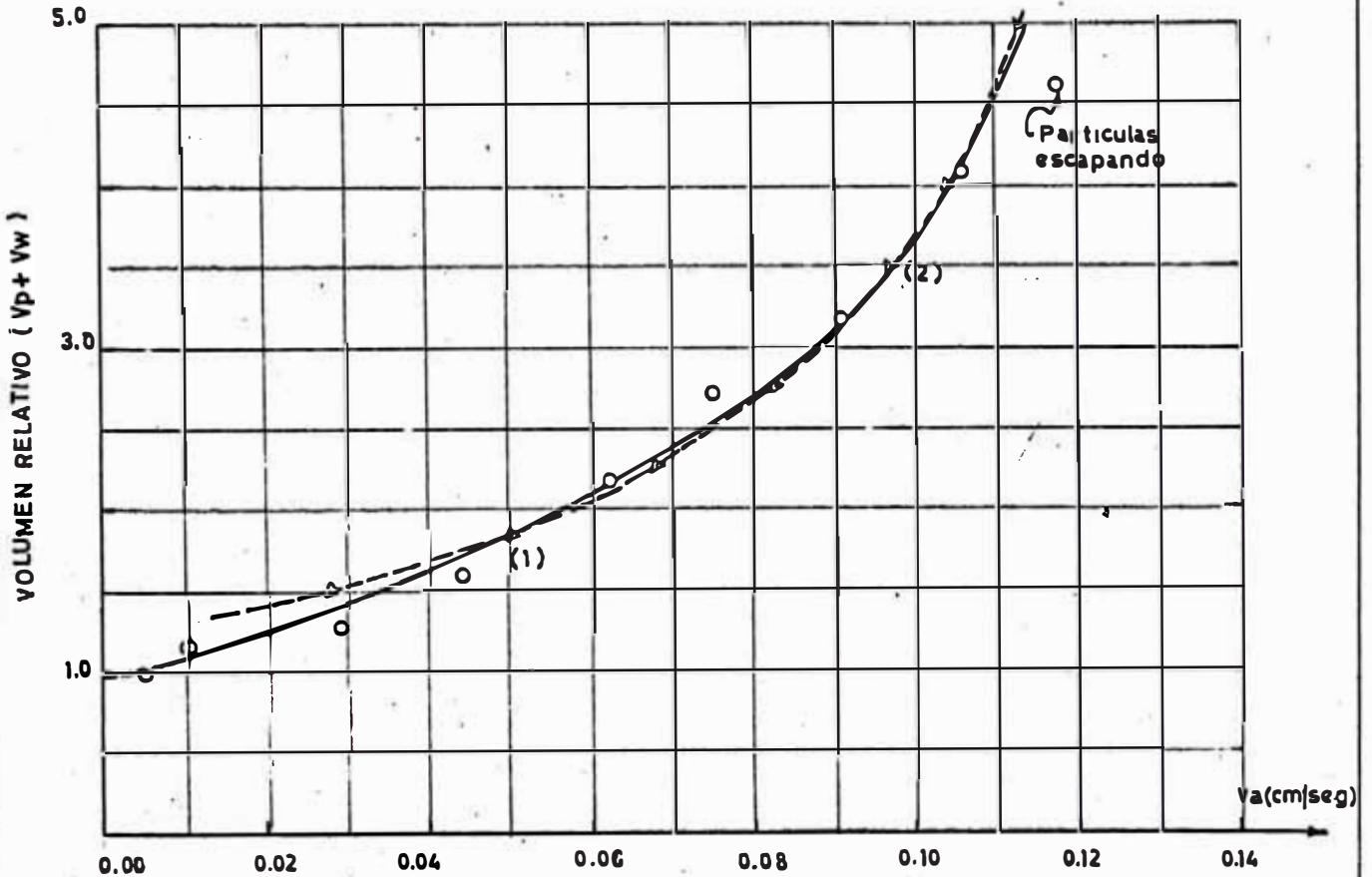


2ª PRUEBA

(Flocs de sulfato de Alumina sin nucleo)

Area transversal 19.6 cms²

h = 2.2 cms.



3ra. Prueba (Lámina # 7)

Material empleadofloces de Sulfato de Alúmina, sin nucleo

Diámetro de tubería ... 5.0 cms

Area de la sección..... 19.65 cm²Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 2.6 cmsDatos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 2.6 | 1.0 | 0.00 | 0.00 |
| 3.0 | 1.15 | 0.277 | 0.0142 |
| 4.0 | 1.54 | 0.555 | 0.0284 |
| 5.0 | 1.92 | 1.220 | 0.0622 |
| 7.2 | 2.76 | 1.760 | 0.0900 |
| 13.0 | 5.00 | 2.640 | 0.1350 |
| 15.0 | 5.75 | 2.640 | 0.1350 |

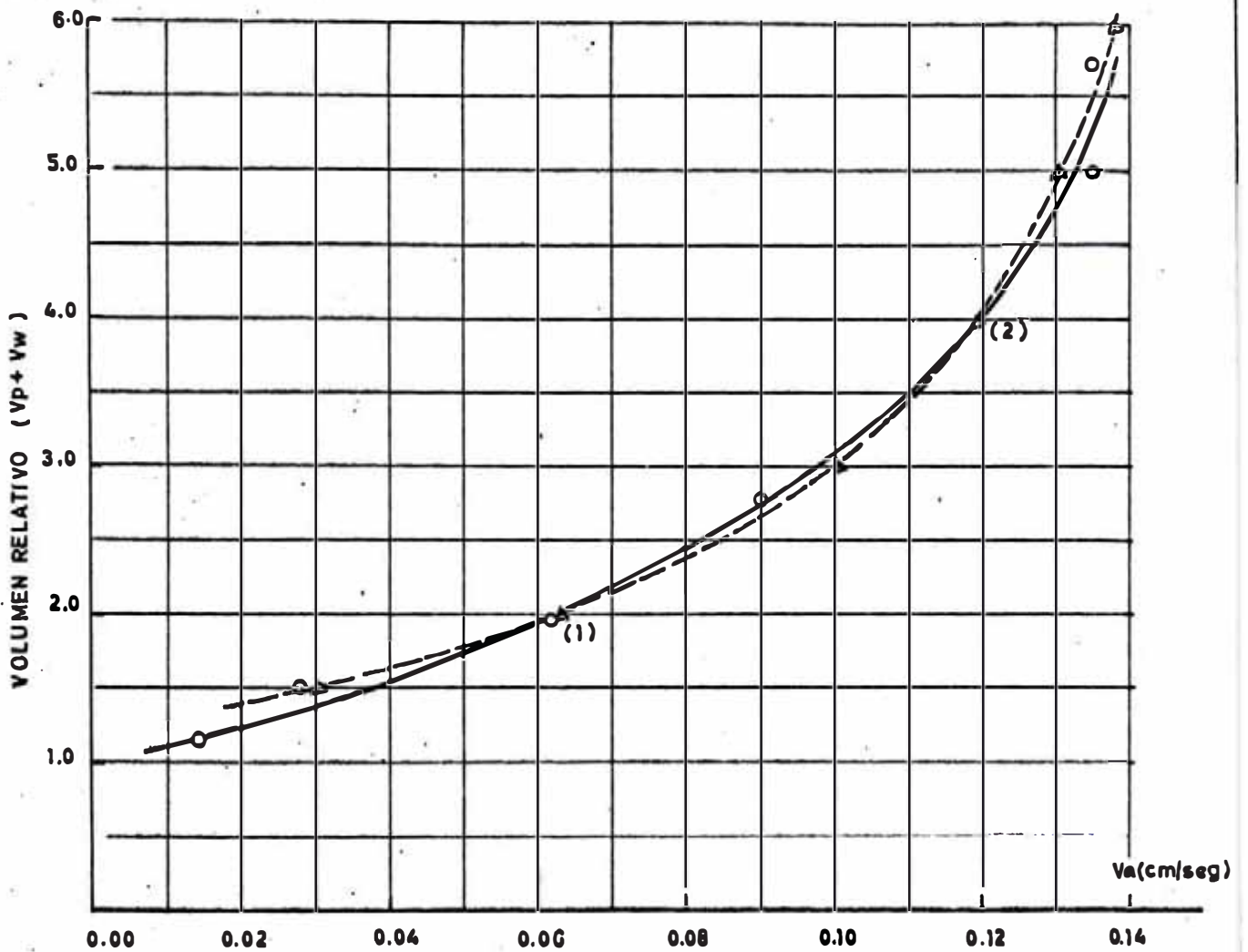
Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.5 | 0.0254 |
| (x) 2.0 | 0.0630 |
| 3.0 | 0.1080 |
| (x) 4.0 | 0.1195 |
| 5.0 | 0.1310 |
| 6.0 | 0.1380 |

Valor obtenido para V_p 1.284Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ 0.176 cm/seg

3era PRUEBA

Flocs de sulfato de Aluminio
 Area transversal = 19.65 cms²
 h = 2.6 cms



4ta. Prueba (Lámina # 8)

Material empleado floc de Cloruro Ferrico

Diámetro de tubería..... 5.0 cms

Área de la sección..... 19.65 cm²Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 3.2 cmsDatos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml./seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 3.2 | 1.0 | 0.210 | 0.0107 |
| 3.7 | 1.16 | 0.778 | 0.0395 |
| 7.7 | 2.40 | 1.730 | 0.0882 |
| 11.3 | 3.53 | 2.500 | 0.1270 |
| 16.0 | 5.00 | 2.830 | 0.1440 |

Datos obtenidos por la fórmula

| Altura relativa % ($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| (x) 1.0 | 0.011 |
| 1.5 | 0.063 |
| 1.8 | 0.0803 |
| 2.5 | 0.1045 |
| (x) 3.0 | 0.115 |
| 4.0 | 0.128 |
| 5.0 | 0.136 |
| Valor obtenido para V_p | 0.9342 |
| Velocidad relativa calculada $v_r = v_s$ | 0.167 cm/seg, |

5ta. Prueba (Lámina # 8)

Material empleado floes de Cloruro férrico
 Diámetro de tubería..... 5.0 cms
 Area de la sección..... 19.65 cm²
 Altura inicial del manto ($V_p + V_w$) 2,0 cms

Datos obtenidos por observación

| Altura del manto ($V_p + V_w$) | Altura relativa % | Flujo (ml/seg) | $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| 2.0 | 1.0 | 0.00 | 0.00 |
| 2.4 | 1.2 | 0.167 | 0.0085 |
| 2.9 | 1.45 | 0.650 | 0.0330 |
| 8.5 | 4.25 | 2.300 | 0.1170 |
| 11.0 | 5.5 | 2.570 | 0.1310 |
| 17.0 | 8.5 | 3.600 | 0.1830 |
| 26.0 | 13.0 | 4.800 | 0.2440 |

Datos obtenidos por la fórmula

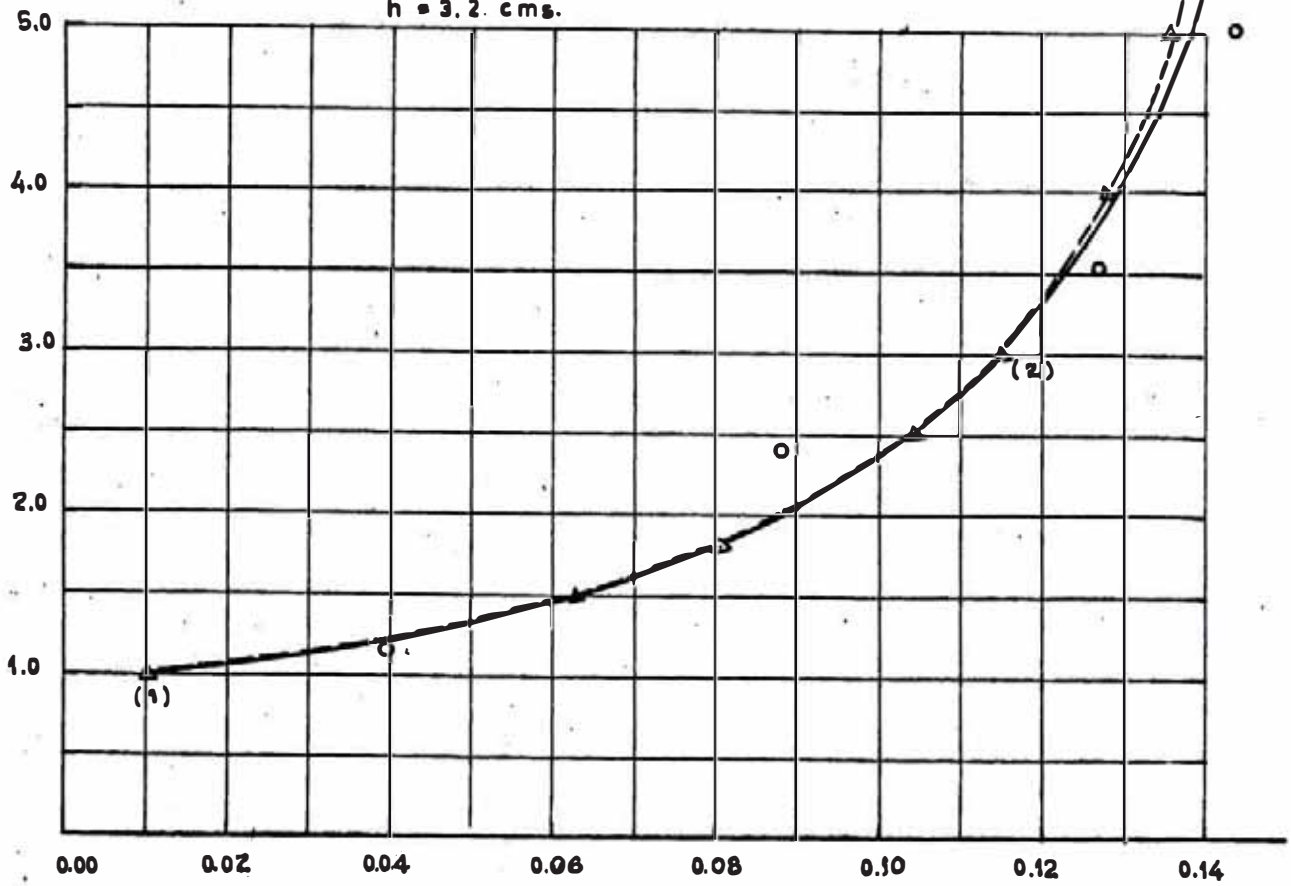
| Altura relativa %($V_p + V_w$) | Velocidad de aproximación $v_a = Q/A$ (cm/seg) |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 2.0 | 0.00358 |
| (x) 3.0 | 0.08190 |
| 4.0 | 0.12100 |
| 6.0 | 0.16030 |
| (x) 9.5 | 0.1900 |
| 12.0 | 0.20500 |

Valor obtenido para V_p 1.97
 Velocidad relativa calculada $v_p = v_a$ 0.239cm/seg.

4ª PRUEBA

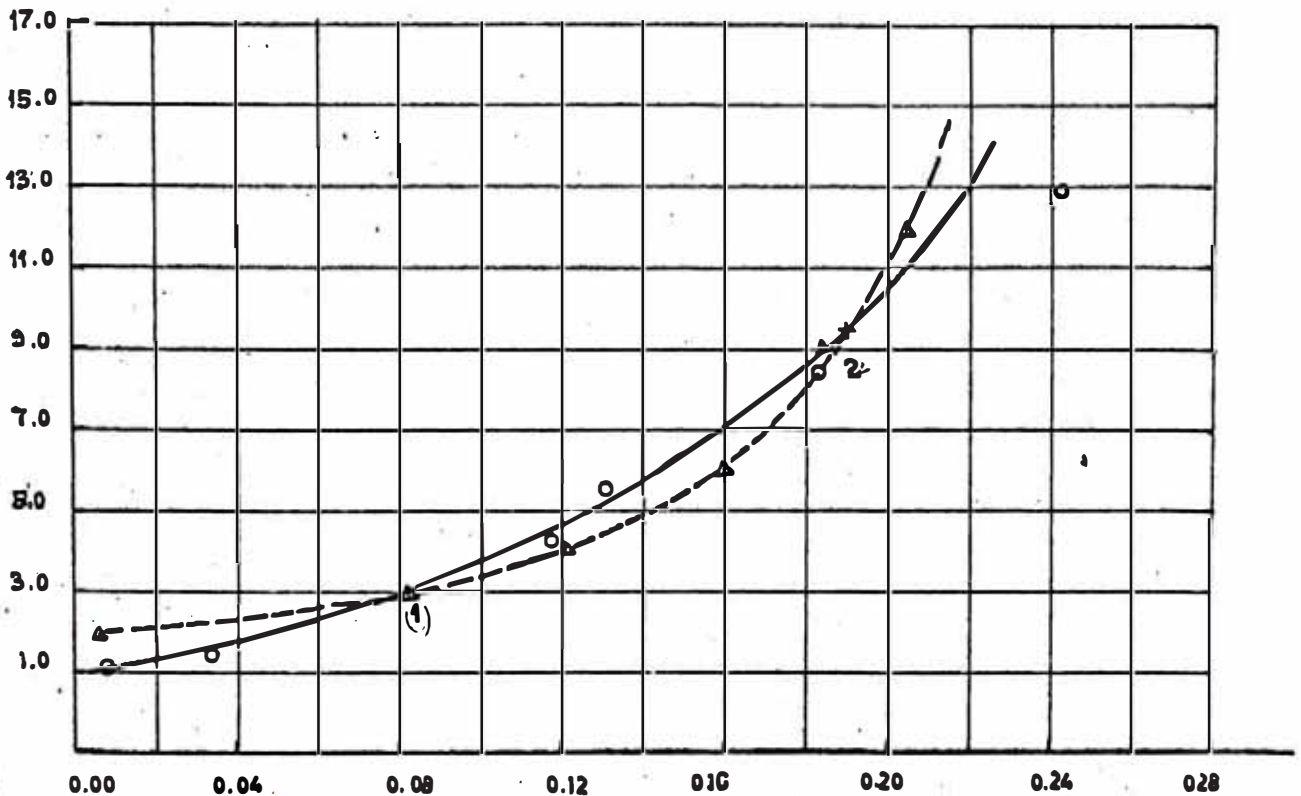
Lamina N° 8

Flocs de Cloruro ferrico
Area transversal = 19.6 cms²
h = 3.2 cms.



5ª PRUEBA

Flocs de Cloruro ferro
Area transversal = 19.6 cms²
h = 2.0 cms.



METODO DE ECUACIONES SIMULTANES

El siguiente, es el método usado en todos los casos para la obtención de los puntos que sirven para el trazado de la curva calculada.

De una curva dibujada con los datos observados, se toman dos puntos (1) y (2), marcados con (x) en la columna de datos calculados, se lee el volumen relativo que corresponde a cada punto y su velocidad de aproximación en los dos ejes respectivos.

El volumen relativo está formado por el volumen de partículas " V_p " que no cambia más el volumen de vacíos " V_w " ocupado por el agua.

Tomemos como ejemplo el correspondiente a la 3ra. Prueba de partículas discretas (arena).

$$\text{Volumen relativo punto (1) } (V_p + V_{w1}) = 1.25 \quad (a)$$

$$\text{Volumen relativo punto (2) } (V_p + V_{w2}) = 3.00 \quad (b)$$

$$\text{Velocidad de aproximación (1)....} \quad 0.20$$

$$\text{Velocidad de aproximación (2)....} \quad 0.88$$

Según fórmula del Ingeniero Brown

$$v_r = v_a \frac{V_p + V_w}{V_w} \quad (c)$$

Reemplazando por los valores leídos.

$$v_r = 0.20 \cdot \frac{1.25}{V_{w1}} \quad (\text{considerando el punto (1)})$$

$$v_r = 0.88 \cdot \frac{3.00}{V_{w2}} \quad (\text{considerando el punto (2)})$$

La velocidad relativa para que la suspensión permanezca en equilibrio debe ser igual a la velocidad de sedimentación de una partícula y es una constante para cada material que se pruebe.

Igualando las velocidades relativas de los puntos (1) y (2) tenemos que:

$$\frac{0.250}{V_{w1}} = \frac{2.64}{V_{w2}}$$

Poniendo V_{w2} en términos de V_{w1}

$$V_{w2} = \frac{2.64}{0.25} V_{w1} = 10.8 V_{w1}$$

Este valor lo reemplazamos en la ecuación (b) y resolviendo el sistema (a) y (b) por ecuaciones simultáneas obtenemos los valores siguientes:

| | | |
|-------------|-------|-------------|
| V_{w1} | | 0.184 |
| V_p | | 1.066 |
| $v_r = v_s$ | | 1.4 cm/seg. |

Con estos datos ya podemos usar la fórmula (c) enunciada anteriormente y para cada valor leído de un volumen relativo, calcular su correspondiente velocidad de aproximación.

Ejemplo:

$$V_p + V_w = 1.1 \dots \dots \dots v_a = 1.4 \left(\frac{1.1 - 1.066}{1.1} \right)$$

Con esta serie de datos se formó la tabla correspondiente a valores calculados y pudo entonces dibujarse la curva punteada.

C A P I T U L O V

DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Confrontación con la teoría

De la comparación de las curvas obtenidas por observación con las obtenidas por el empleo de la fórmula, podemos decir que es factible usar ésta para el cálculo de las posibles expansiones de un manto de suspensión de partículas bajo ciertas variaciones de flujo.

Estas variaciones de flujo pueden tener lugar, debido a sacar de servicio una o más unidades para limpieza o también a causa de la mayor o menor turbidez de las aguas en ciertas épocas, lo que daría lugar a una mayor concentración o compactación en algunos casos o a que escapen por disminuir dicha concentración en otros casos si es que se mantuviera constante la velocidad.

Posibles razones para la variación entre lo observado y la teoría.

Diremos que hay variación entre lo observado y la teoría en algunos tramos de ciertas curvas, pero esta variación es debida más que nada a la imprecisión para escoger los puntos que nos sirvan de base en el desarrollo de las ecuaciones simultaneas.

En las pruebas con partículas discretas las expansiones posibles calculadas son siempre mayores que las-

observadas y comienzan a apartarse con un volumen relativo de 3 a 1 en las de densidad 1.11 y a un volumen relativo menor para las de mayor densidad. Además puede verse que para una concentración mayor la velocidad de aproximación o sedimentación del manto es menor considerando una misma expansión relativa.

En las pruebas con partículas floculentas la curva calculada coincide en casi todos los casos con las curvas formadas por observación llegando en el caso de la 4ta prueba con flocs de cloruro férrico a superponerse totalmente a ella.

Creemos que esto se debe al cuidado que se tuvo para leer la velocidad inicial con la cual la altura del manto no variaba. Si en el futuro se toma con suficiente precisión esta velocidad es casi seguro que las curvas calculadas coincidirán con las curvas observadas.

C A P I T U L O VI

C O N C L U S I O N E S

Observando las curvas correspondientes a las pruebas 1ra y 2da con partículas discretas (zeolita) podemos decir que la separación entre paredes, es decir el diámetro que pueda darse a un tanque de sedimentación en este sistema, no afecta la expansión que tendrá el manto de partículas bajo una carga superficial determinada.

Si observamos la curva correspondiente a la 3ra. prueba con partículas discretas (arena) podemos ver que para una velocidad dada, la expansión que se consigue con partículas más pesadas será menor, disminuyendo esta expansión conforme la densidad aumenta.

Estudiando las curvas observadas con partículas floculentas puede decirse que también con estas se cumple lo sucedido con partículas discretas, es decir a mayor densidad de las partículas menor expansión.

Resumiendo diremos lo siguiente:

- a) La mayor área superficial que pueda darse a un tanque de flujo vertical, no afectará la expansión relativa que sufrirá una suspensión de partículas para una misma variación de carga superficial.
- b) La expansión de una suspensión es función de la velocidad de desplazamiento del agua que las contiene y se rige de-

acuerdo a la fórmula presentada por los Ingenieros Brown y Navarro.

- c) La expansión de una suspensión de partículas es función inversa de la densidad de tales partículas.
- d) Para evitar que la suspensión pueda escapar fácilmente - conviene diseñar los tanques con una carga máxima equivalente a la velocidad de sedimentación de una partícula - en forma aislada pero hacerlo trabajar solo al 50% de esta carga para poder soportar las variaciones que siempre tiene lugar en los flujos.
- e) Para poder determinar la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión en cada caso especial de tratamiento de agua, el procedimiento empleado en el presente trabajo sería recomendable por la simplicidad del equipo y la rapidez del control. Esto podría usarse tanto para el control en la operación de Plantas de Tratamiento como para su diseño.

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

- Newton "Water Supply and Waste - Water Disposal"
por Fair y Geyer. Pag. 586. Año 1954
- ² G.G. Stokes, Transactions of Cambridge Philosophical
Society. 8, 287 (1845)
- ³ N. Reynolds
- ⁴ Allen Hazen " On Sedimentation " Transaction of American
Society of Civil Engineers 53, 65 (1904)
- ⁵ T.R. Camp " Sedimentation and the Design of Settling Tanks"
Transaction of American Society of Civil Engineers, 111,901
(1945)
- ⁶ A. Hazen. " On Sedimentation "
- ⁷ Cuadro obtenido de Curso de Post-Grado.Univ.Chile(9-19-Dic.64).
- ⁸ A.W.Bond " Behavior of suspensions" Society of Civil
Engineers, Mayo, 1960, pag. 60 (Journal of the Sanitary
Engineering Division)
- ⁹ A.A. Kalinske " Settling Characteristic of Suspensión in
Water Treatment Processes" Journal, Amer. Waterworks Assn.
Vol. 40 No 113, February, 1948.
- ¹⁰ N.D.R. Schaafsma " Besenkingals onderdeel van der waterzui-
vering" de Ingenieur Vol 62, No 4, January, 1950, p.61
- ¹¹ J.C.Brown " Investigaciones en Ingeniería Sanitaria en el
Perú" presentado al X Congreso de Ingeniería Sanitaria en
San Salvador (pag. 18).