

01177
1.1ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Sección de Ingeniería Ambiental

**DISEÑO E INSTALACION DE UN MODELO PARA
FILTRACION DIRECTA DE AGUAS TURBIAS**

Tesis con Valor en Créditos

Para optar al grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AMBIENTAL

P r e s e n t a :

Ing. Alvaro Coronado Jurado

México, D. F.

1984

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

CAPITULO I	Antecedentes
CAPITULO II	Consideraciones sobre la filtración
	2.1. Avances en la teoría de la filtración
	2.2. Filtración rápida convencional y filtración directa.
CAPITULO III	Objetivos y Alcances
CAPITULO IV	Planteamiento del Experimento
	4.1. Generalidades
	4.2. Consideraciones para el diseño de filtros piloto
	4.3. Definición y Clasificación de variables experimentales.
	4.3.2. Dimensiones de los lechos filtrantes
	4.3.2. Tasas de filtración
	4.3.3. Tratamiento químico
	4.3.4. Propiedades del medio
	4.3.5. Requerimientos del retrolavado

4.4 Parámetros a determinar

4.4.1. Capacidad de retención del filtro.

4.4.2. Capacidad hidráulica del filtro do.

4.4.3. Gradiente Hidráulico

4.4.4. Duración del ciclo de filtrado do.

4.5. Pruebas o carreras de filtración a efectuar.

CAPITULO V Equipo Experimental y Materiales

CAPITULO VI Procedimiento Experimental

6.1. Preparación del medio filtrante

6.2. Análisis y Propiedades Granulométricas ons.

6.2.1. Análisis de la arena media
(Columna de Filtración # 1)

6.2.2. Análisis de la Antracita
(Columna de Filtración # 1)

6.2.3. Análisis de la arena gruesa
(Columna de Filtración # 2)

6.3. Determinación de las propiedades físicas de los medios filtrantes

6.4. Preparación del agua sintética

6.4.1. Introducción

6.4.2. Antecedentes

- a) Componentes minerales de las arcillas.
- b) Propiedades físico-químicas de las arcillas
- c) Estabilidad de los coloides
- d) El mecanismo de la defloculación de suspensiones de arcilla.

6.4.3. Pruebas preliminares. Selección de la arcilla.

a) Introducción

b) Metodología experimental y análisis de resultados

6.4.4. Pruebas finales para la preparación del agua sintética

a) Introducción

b) Metodología experimental y análisis de resultados.

CAPITULO VII Metodología para el Análisis de Resultados

7.1. Introducción

7.2. Desarrollo

7.2.1. Etapas de la Filtración Directa

7.2.2. Efecto de la condición de dosificación de coagulante.

- 7.2.3. Efecto de la velocidad de filtración
- 7.2.4. Caracterización del floc obtenido en cada prueba.
- 7.2.5. Caracterización de la operación de los estratos del lecho filtrante.
- 7.2.6. Determinación del avance del frente de imbedimento.
- 7.2.7. Determinación de la profundidad óptima de operación del lecho filtrante.

CAPITULO VIII Conclusiones y Recomendaciones

- 8.1. Conclusiones
- 8.2. Recomendaciones

- Anexos
- Referencias
- Bibliografía

I.- ANTECEDENTES

La División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Sección de Ingeniería Ambiental, promovió la construcción, en Coordinación con la Dirección de Obras de la UNAM, de un modelo experimental, consistente en dos columnas de sección cuadrada en acrílico con todos los implementos para ser operadas en paralelo, como filtros piloto y aplicando la técnica de tratamiento conocida como filtración directa o filtración-floculación por contacto de alta tasa.

La culminación de este esfuerzo se circunscribe dentro de las inquietudes de años atrás, de varios profesores de la División y especialmente del M. en I. Gastón Mendoza G. , Director de esta tesis, del M. en I. Arnulfo Paz R. y del M. en C. Francisco Montejano, de contar dentro del Laboratorio, tanto en el tratamiento de agua potable así como de aguas residuales, de modelos apropiados para la investigación y experimentación.

Dentro de esta circunstancia y ante la sugerencia y posterior

dirección y asesoría del Prof. Mendoza G. , se completó la construcción del modelo y se desarrolló la presente investigación destinada a cumplir con los requisitos necesarios para optar por la Maestría en Ingeniería Ambiental.

El presente trabajo se sustenta en una adecuada revisión bibliográfica, principalmente de artículos publicados en revistas técnicas especializadas en el tema, los cuales conformaron los límites y marco de referencia de la investigación. Por otro lado se debe reseñar el hecho de que la presente investigación cubre una primera etapa, preliminar a la operación propiamente dicha de los filtros piloto y es de esperar que en un corto período otros estudiantes, retomando las ideas básicas de lo que aquí se expone, con los cambios que se juzgue pertinente introducir, lleven a un feliz término el proyecto.

pa denominada de adhesión, de índole físico-química.

Con un aporte reciente Mintz (Ref. # 22) sugirió la existencia de una tercera etapa denominada de disgregación.

En la misma las partículas empiezan a separarse, al tanto que otras van ocupando los sitios vacantes dejados por aquellas.

En lo referente a la etapa de transporte, Iven y otros investigadores definieron a su vez la existencia de cuatro mecanismos físicos, responsables del transporte de partículas en los poros del filtro, a saber: sedimentación, intercepción, difusión y rotación. Esta última causada por el régimen hidrodinámico.

El predominio de uno u otro mecanismo físico es función principalmente, del tamaño de la partícula. Para tamaños mayores a 25 u.m. , la sedimentación es dominante. En partículas menores a 1 u.m. la difusión Browniana es el mecanismo principal.

O'Melia estableció que los mecanismos de transporte son

II Consideraciones sobre la filtración

2.1. Avances en la Teoría de la Filtración

En la actualidad el proceso de filtración es considerado como componente fundamental dentro de la tecnología del tratamiento de agua para consumo humano. En este campo no han desarrollado importantes investigaciones y teorías tendientes a explicar, en ocasiones mediante el empleo de complejos desarrollos matemáticos, la remoción de partículas en estado de suspensión o coloidal a través del paso del agua por un medio filtrante poroso. Dentro de ellas destacan los estudios elaborados por Crane, Iwanaki, Ives, O'Melia, Stum y Mintz.

Analizando directamente lo que se refiere a los factores que controlan la remoción de partículas dentro del lecho filtrante, O'Melia y Stumm (Ref #21) definieron dos etapas en los procesos de remoción: una etapa de transporte de características hidráulicas y físicas, y una eta-

procesos muy eficientes en los poros del filtro, para el filtrado de aguas residuales y para uso notable; lo cual resulta válido aún para partículas con una habilidad mínima de transporte.

Otro mecanismo de filtración a ser considerado, aún cuando no es propiamente un mecanismo de transporte, es el cernido intersticial o la retención de las partículas en las juntas de los granos del lecho.

Herzig (Ref. # 23) determinó la importancia de este mecanismo para razones de partícula/grano iguales o mayores a 0.05. Se puede decir entonces que entre mayor es la concentración de partículas en una suspensión, más probable es la remoción de pequeñas partículas por cernido. Con relación a la etapa de adhesión, se debe indicar que la misma consiste del enlazamiento o ligazón de la partícula al grano. Depende de mecanismos físico-químicos, los cuales se clasifican de acuerdo a dos modelos:

- el modelo de la doble capa, basado en la interacción

INDICE

CAPITULO I	Antecedentes
CAPITULO II	Consideraciones sobre la filtración
	2.1. Avances en la teoría de la filtración
	2.2. Filtración rápida convencional y filtración directa.
CAPITULO III	Objetivos y Alcances
CAPITULO IV	Planteamiento del Experimento
	4.1. Generalidades
	4.2. Consideraciones para el diseño de filtros piloto
	4.3. Definición y Clasificación de variables experimentales.
	4.3.2. Dimensiones de los lechos filtrantes
	4.3.2. Tasas de filtración
	4.3.3. Tratamiento químico
	4.3.4. Propiedades del medio
	4.3.5. Requerimientos del retrolavado

4.4 Parámetros a determinar

4.4.1. Capacidad de retención del filtro.

4.4.2. Capacidad hidráulica del filtra
do.

4.4.3. Gradiente Hidráulico

4.4.4. Duración del ciclo de filtra-
do.

4.5. Pruebas o carreras de filtración a
efectuar. .

CAPITULO V Equipo Experimental y Materiales

CAPITULO VI Procedimiento Experimental

6.1. Preparación del medio filtrante

6.2. Análisis y Propiedades Granulométr
cas.

6.2.1. Análisis de la arena media
(Columna de Filtración # 1)

6.2.2. Análisis de la Antracita
(Columna de Filtración # 1)

6.2.3. Análisis de la arena gruesa
(Columna de Filtración # 2)

6.3. Determinación de las propiedades físicas de los medios filtrantes

6.4. Preparación del agua sintética

6.4.1. Introducción

6.4.2. Antecedentes

- a) Componentes minerales de las arcillas.
- b) Propiedades físico-químicas de las arcillas
- c) Estabilidad de los coloides
- d) El mecanismo de la defloculación de suspensiones de arcilla.

6.4.3. Pruebas preliminares. Selección de la arcilla.

- a) Introducción
- b) Metodología experimental y análisis de resultados

6.4.4. Pruebas finales para la preparación del agua sintética

- a) Introducción
- b) Metodología experimental y análisis de resultados.

CAPITULO VII Metodología para el Análisis de Resultados

7.1. Introducción

7.2. Desarrollo

7.2.1. Etapas de la Filtración Directa

7.2.2. Efecto de la condición de dosificación de coagulante.

- 7.2.3. Efecto de la velocidad de filtración
- 7.2.4. Caracterización del floc obtenido en cada prueba.
- 7.2.5. Caracterización de la operación de los estratos del lecho filtrante.
- 7.2.6. Determinación del avance del frente de inmedimento.
- 7.2.7. Determinación de la profundidad óptima de operación del lecho filtrante.

CAPITULO VIII Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

8.2. Recomendaciones

- Anexos
- Referencias
- Bibliografía

I.- ANTECEDENTES

La División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Sección de Ingeniería Ambiental, promovió la construcción, en Coordinación con la Dirección de Obras de la UNAM, de un modelo experimental, consistente en dos columnas de sección cuadrada en acrílico con todos los implementos para ser operadas en paralelo, como filtros piloto y aplicando la técnica de tratamiento conocida como filtración directa o filtración-floculación por contacto de alta tasa.

La culminación de este esfuerzo se circunscribe dentro de las inquietudes de años atrás, de varios profesores de la División y especialmente del M. en I. Gastón Mendoza G. , Director de esta tesis, del M. en I. Arnulfo Paz R. y del M. en C. Francisco Montejano, de contar dentro del Laboratorio, tanto en el tratamiento de agua potable así como de aguas residuales, de modelos apropiados para la investigación y experimentación.

Dentro de esta circunstancia y ante la sugerencia y posterior

dirección y asesoría del Prof. Mendoza G. , se completó la construcción del modelo y se desarrolló la presente investigación destinada a cumplir con los requisitos necesarios para optar por la Maestría en Ingeniería Ambiental.

El presente trabajo se sustenta en una adecuada revisión bibliográfica, principalmente de artículos publicados en revistas técnicas especializadas en el tema, los cuales conformaron los límites y marco de referencia de la investigación.

Por otro lado se debe reseñar el hecho de que la presente investigación cubre una primera etapa, preliminar a la operación propiamente dicha de los filtros piloto y es de esperar que en un corto periodo otros estudiantes, retomando las ideas básicas de lo que aquí se expone, con los cambios que se juzgue pertinentes introducir, lleven a un feliz término el proyecto.

II Consideraciones sobre la filtración

2.1. Avances en la Teoría de la Filtración

En la actualidad el proceso de filtración es considerado como componente fundamental dentro de la tecnología del tratamiento de agua para consumo humano. En este campo se han desarrollado importantes investigaciones y teorías tendientes a explicar, en ocasiones mediante el empleo de complejos desarrollos matemáticos, la remoción de partículas en estado de suspensión o coloidal a través del paso del agua por un medio filtrante poroso. Dentro de ellas destacan los estudios elaborados por Cams, Iwanaki, Ives, O'Melia, Stum y Mintz.

Analizando directamente lo que se refiere a los factores que controlan la remoción de partículas dentro del lecho filtrante, O'Melia y Stumm (Ref #21) definieron dos etapas en los procesos de remoción: una etapa de transporte de características hidráulicas y físicas, y una eta-

pa denominada de adhesión, de índole físico-química.

Con un aporte reciente Wintz (Ref. # 22) sugirió la existencia de una tercera etapa denominada de disgregación.

En la misma las partículas empiezan a separarse, al tanto que otras van ocupando los sitios vacantes dejados por aquellas.

En lo referente a la etapa de transporte, Ives y otros investigadores definieron a su vez la existencia de cuatro mecanismos físicos, responsables del transporte de partículas en los poros del filtro, a saber: sedimentación, intercepción, difusión y rotación. Esta última causada por el régimen hidrodinámico.

El predominio de uno u otro mecanismo físico es función principalmente, del tamaño de la partícula. Para tamaños mayores a 25 u.m. , la sedimentación es dominante. En partículas menores a 1 u.m. la difusión Browniana es el mecanismo principal.

O'Melia estableció que los mecanismos de transporte son

procesos muy eficientes en los poros del filtro, para el filtrado de aguas residuales y para uso notable; lo cual resulta válido aún para partículas con una habilidad mínima de transporte.

Otro mecanismo de filtración a ser considerado, aún cuando no es propiamente un mecanismo de transporte, es el cernido intersticial o la retención de las partículas en las juntas de los granos del lecho.

Herzig (Ref. # 23) determinó la importancia de este mecanismo para razones de partícula/grano iguales o mayores a 0.05. Se puede decir entonces que entre mayor es la concentración de partículas en una suspensión, más probable es la remoción de pequeñas partículas por cernido. Con relación a la etapa de adhesión, se debe indicar que la misma consiste del enlazamiento o ligazón de la partícula al grano. Depende de mecanismos físico-químicos, los cuales se clasifican de acuerdo a dos modelos:

- el modelo de la doble capa, basado en la interacción

entre las fuerzas atractivas de Van der Waals y las fuerzas repulsivas, ambas de naturaleza electrostática; y - el modelo del puente químico, que pretende explicar los efectos resultantes del enlazamiento de los puentes químicos de las partículas en suspensión y el medio a través de su reacción con el floculante.

Las teorías modernas para tratar de explicar los efectos del floculante recurren al menos parcialmente, al modelo del puente químico.

Stumm y Morgan mostraron que la acción de los floculantes convencionales - sales de aluminio o hierro - tiene lugar en dos fases (Ref. # 24) :

- a) neutralización de la carga negativa de la partícula por el hidróxido positivo, y
- b) formación de floc por enlaces entre las partículas como resultado de adsorción en las cadenas poliméricas.

Al tanto que si se emplean polímeros sintéticos, la Mer

y Healy explican la floculación como la adsorción del ne-
lmero en la superficie de las partículas y el enlaza-
miento entre ellas, con la ayuda de los segmentos li-
bres de los polímeros adsorvidos.

Este enlazamiento resulta en la formación de fuertes y
largas estructuras tridimensionales.

2.2. Filtración Rápida Convencional y Filtración Directa

La filtración rápida convencional se define como aquella
que utiliza medio único de arena, medios duales (arena-
antracita) o medios múltiples o mezclados (arena-antraci-
ta-granate, principalmente) y en la cual, para el medio
único, el flujo se da del material fino al grueso con
tasas de filtración que oscilan de 120 a 160 m/día para
filtros rápidos de arena a 300-360 m/día para filtros
rápidos de medios duales o múltiples empleando polielec-
trolitos (S. Kawamura, Ref. # 3). En el caso de la fil-

tración rápida convencional el agua debe recibir un pretratamiento adecuado que incluya coagulación, floculación y sedimentación.

Por otro lado la filtración directa, según la define el ANWA "Water Quality Div. Com. on Coagulation-Filtration"(Ref.#5) es una secuencia de procesos con la adición de coagulantes, con o sin floculación, sin sedimentación, seguida por filtración. El proceso de filtración directa difiere de los procesos convencionales de sedimentación-filtración en que tanto los sólidos presentes en las aguas, así como los agregados a ella como parte del tratamiento (alumbre, polímeros, carbón para control de olores y sabores, etc.) deben ser almacenados dentro del lecho filtrante. De acuerdo con Avner Adin y Menahem Rebbun (Ref. # 4) la filtración directa requiere tener un gran diámetro de grano para disminuir la pérdida de carga, así como alimentar la suspensión a filtrar con el coagulante, inmediatamente antes de entrar al filtro, para lograr una

gran adhesión de las partículas a los granos del lecho, capaz de resistir los grandes esfuerzos cortantes generados en el proceso así como lograr un aprovechamiento óptimo de la capacidad del lecho.

Dichos investigadores denominan al proceso "floculación por contacto-filtración" dado que la floculación ocurre durante el contacto de las partículas con el medio filtrante.

III.- OBJETIVOS Y ALCANCES:

Como objetivo general, dentro del cual la presente investigación cumple con las etapas preliminares o preparatorias, se plantea el evaluar mediante un modelo experimental, el comportamiento de un filtro de medio único constituido por arena gruesa y una profundidad avariacible del lecho filtrante, acorde con lo que ha sido práctica común, aunque no exclusiva, de muchos países europeos, en comparación con un filtro de medio dual (arena-antracita) de uso intensivo en los Estados Unidos y algunos otros países americanos.

Como objetivos específicos a desarrollar en este trabajo se incluyen:

- diseño del modelo de laboratorio y de la investigación;
- construcción de los filtros e instalaciones accesorias;
- selección, cribado y análisis de materiales filtrantes;
- pruebas para la preparación del agua sintética;
- metodología para la obtención de la dosis adecuada de coa-

gulantas a emplear en las carreras de filtración futuras; y
- metodología para el análisis de los resultados.

El desarrollo de las pruebas o carreras de filtración se efectuaría posteriormente en otras investigaciones, para lo cual, se pretende, lo aquí desarrollado, sirva de base con las modificaciones necesarias.

Aún cuando en filtración directa, ya sea en plantas de tratamiento existentes o en modelos experimentales a escala piloto, se han efectuado bastantes investigaciones, las modalidades de dicho proceso, sus múltiples objetivos de aplicación al tratamiento de aguas, así como la gran cantidad de variables que intervienen en él, originan que el tema no esté de ningún modo agotado y que potencialmente presente grandes posibilidades para futuras investigaciones.

Precisamente, según señala un informe presentado por el Sub-Comité de Filtración Directa, perteneciente al Comité de Filtración de la AWWA (Ref. # 5) a mediados de 1980,

dentro de las recomendaciones para investigación futura se refiere al tamaño y tipo de medio usado en el proceso de filtración directa. También menciona en otro aparte, el interés creciente y la obtención de buenos resultados empleando un medio simple de arena de un gran tamaño efectivo y un profundo lecho filtrante.

Como una observación adicional y a la vez limitante de la presente investigación, se hace hincapié en el hecho de que la misma, de ningún modo pretende presentar un molde o esquema rígido para el trabajo subsiguiente de operación de los filtros y análisis de resultados.

Los parámetros y variables experimentales planteados para las carreras de filtración que son sugeridas, aún cuando son debidamente justificadas, deben ser modificadas o adecuadas a la luz de los resultados obtenidos en las primeras pruebas o en base a cualesquiera otras consideraciones de fondo que se establezcan.

Con carácter de originalidad, por lo menos en lo referente a su aplicación al caso del tratamiento de aguas, se efectuaron las investigaciones relativas a la elaboración de suspensiones coloidales para ser utilizadas como agua sintética en las pruebas posteriores de filtración.

IV PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

4.1 Generalidades

Varios investigadores, entre ellos Mintz y Camp a mediados de la década de los 60 y más recientemente Adin, Baumann y Cleasby, han reseñado la importancia de la utilización, a nivel experimental, de plantas piloto para encontrar las mejores soluciones, tanto desde el punto de vista técnico como económico, a los problemas presentados en la filtración de aguas.

Aún cuando gran cantidad de investigaciones y estudios han sido efectuados, principalmente en los últimos 25 años, de rivándose de los mismos muchas teorías tendientes a explicar qué sucede con el paso del agua a través de un medio poroso; son tantas las variables que intervienen en el proceso - se habla de más de 20 factores que inciden en la filtración - que algunos autores, entre ellos Susumu Kawamura (Ref. # 3), hablan de la filtración más en térmi

nos de arte que de ciencia. Y es precisamente éste razonamiento el que explica y justifica el empleo, en este campo, de modelos a escala, tanto con propósitos prácticos, como una etapa preliminar para el diseño de proyectos específicos, como para investigar y comparar la incidencia de determinadas variables en el proceso, de acuerdo a la perspectiva de las diferentes tendencias o escuelas. Para cumplir con el objetivo básico, ya reseñado anteriormente en el presente trabajo, de evaluar el comportamiento de dos lechos filtrantes diferentes en cuanto a materiales, tamaño de grano y espesor de lecho; se vuelve una necesidad insoslayable la aplicación correcta de la teoría de la filtración al diseño del experimento. En general la metodología se basa en sugerencias efectuadas por Avner Adin y otros en el artículo "The application of Filtration Theory Pilot-Plant Design" (Ref. # 6). También se utilizaron otras referencias, para aplicaciones más específicas, las cuales se mencionan en su oportunidad.

4.2 Consideraciones para el diseño de los filtros piloto

Se utiliza un agua sintética de alta, intermedia y baja turbiedad, la cual pretende simular, en los dos primeros casos, un agua, natural, sin color, como la que se presenta en algunos ríos. El agua sintética de baja turbiedad refleja las condiciones existentes en las aguas naturales de ciertos lagos, en donde la turbiedad es causada por algunos coloides minerales, principalmente arcillas. En todos los casos se simulan en el laboratorio las condiciones para el tratamiento de dichas aguas y su adecuación para el consumo humano, aplicando filtración directa con dos lechos de características diferentes.

Para seleccionar el valor de las turbiedades en el agua sintética se toman en consideración estudios anteriores. El Comité de Filtración de la AWWA, en un reporte (Ref. # 5) menciona que turbiedades de agua cruda mayores de 15 NTU, podrían dar problemas, a menos que se tomen cier

tas previsiones, para su aplicabilidad a filtración directa.

Además, en otro anexo, indica que, en cuanto a turbiedad se refiere, valores consistentemente menores de 5 NTU (unidades de turbiedad nefelométricas) pueden ser muy adecuadas para la aplicación de esta técnica.

Kawamura(Ref#3) también coincide en valores de turbiedad de 5 NTU o menores y señala que valores promedio que excedan de 10 NTU en el agua cruda pueden presentar problemas, resultando la filtración directa ineficiente principalmente por el acortamiento de las carreras de filtración.

Por otro lado Russell L. Culp (Ref. # 2) menciona la posibilidad de aplicar filtración directa, si la turbiedad del agua cruda no excede 200 NTU (siempre y cuando el color sea bajo).

Aparte de las anteriores recomendaciones se analizan otras investigaciones efectuadas con filtros pilotos, cuyas aplicaciones, en cuanto a turbiedad del agua a filtrar se re-

sumen a continuación:

- W Hutchison y P. D. Foley (Ref. # 7) analizan una serie de investigaciones efectuadas en filtros piloto para convertir varias plantas canadienses a filtración directa. Se probó con diferentes turbiedades en varias etapas: menores a 5 NTU. en el lago Huron y entre 10 y 25 NTU. en el lago Erie.

- R. G. Tredgett (Ref. # 8) menciona varios estudios piloto efectuados para modificar una planta convencional a filtración directa en Toronto, Canadá. Los mismos fueron llevados a cabo en varias etapas y se probó con turbiedades menores a 85 NTU. en el afluente a los filtros.

- Ch. M. Spink y J. T. Moncovitz (Ref. # 9) analizan la Planta de Tratamiento Alfred Merrit Smith (perteneciente al Southern Nevada Water System) la cual opera con el sistema de filtración directa. La Planta opera con tur

turbiedades menores de 1 NTU generalmente y en ocasiones la turbiedad medio del Lago Mead (fuente) ha alcanzado valores máximos de 25 NTU. En los registros históricos nunca se ha excedido este valor.

- Carol H. Tate y otros (Ref. # 10) efectuaron estudios piloto para determinar la viabilidad de utilizar filtración directa para el abastecimiento a la ciudad de Utah, utilizando el reservorio Deer Creek en el Provo River. Se probó con turbiedades promedio de 2.5 NTU.

En base a todas las consideraciones anteriores, se decide emplear agua sintética con tres diferentes turbiedades:

- Agua Tipo I : turbiedad de 10 NTU
- Agua Tipo II : turbiedad de 20 NTU
- Agua Tipo III : turbiedad de 100 NTU

El agua tipo I corresponde a un agua, la cual normalmente puede ser tratada mediante filtración directa.

El Agua tipo II se seleccionó por corresponder , el valor de 15 NTU, al límite propuesto por el Comité de Filtración de la AWWA para poderla tratar sin problemas, aplicando filtración directa. Se aumentó tal valor a 20 NTU.

El agua tipo III se seleccionó por corresponder a un agua de alta turbiedad para su tratamiento mediante filtración directa. Dicho Comité de La AWWA (Ref. # 5) menciona el caso de la "American Oil Plant en Texas U.S.A. la cual trata, aplicando filtración directa, agua de río con turbiedades que normalmente oscilan entre 75 y 100 NTU. y en ocasiones tan altas como 200 NTU. Por esto se consideró interesante probar las columnas filtrantes, con un valor alto y poco usual en plantas de filtración directa de 100NTU.

En cuanto a los objetivos o metas de calidad de agua a ser conseguidos en el efluente de los filtros piloto, se buscó ser congruente con los nuevos estándares estadounidenses.

ses para el agua de bebida, los cuales especifican turbiedades menores a 1 NTU.

4.3 Definición y clasificación de variables experimentales

4.3.1. Dimensiones del lecho filtrante (Área y profundidad).

Dado que el objetivo básico es comparar dos tipos diferentes de lechos, el experimento se diseñó empleando dos columnas de acrílico de sección cuadrada con diferentes espesores y características de material. Las mismas se operarán simultáneamente y en paralelo para condiciones químicas e hidráulicas dadas. Las características del material en ambos filtros permanecerán invariables durante todo el período de prueba.

La columna # 1 con área transversal de 0.01625 m^2 consiste de un medio dual, arena-antracita, con un espesor conjunto de lecho filtrante de 0.80 m.

La Columna # 2 con área transversal de 0.0225 m^2 consiste de un medio único constituido por arena gruesa, con un espesor de lecho filtrante de 1.15 m.

Las características de ambas se detallan en el Capítulo V. Aún cuando la práctica americana convencional abunda en ejemplos de aplicación de medios duales y múltiples en filtración directa, tanto a nivel de Plantas de Tratamiento en operación como a nivel de investigación empleando filtros piloto; no sucede lo mismo en el caso de medios únicos de arena de lecho profundo. Este tipo de filtros de gran espesor de lecho, constituido por arena de un tamaño efectivo apreciable no han sido muy empleados ni adecuadamente investigados en América, aún cuando en Europa ya hay una larga tradición en cuanto a su aplicación para diferentes usos. Las principales diferencias con los filtros americanos son las siguientes:

- generalmente son de medio único, constituido por arena;
- el medio tiene tamaños efectivos mayores;
- la profundidad del lecho es mayor (de 1.22 a 1.83 m.); y
- se utiliza aire como mecanismo principal de lavado del lecho y en grandes cantidades. El agua juega un papel complementario y se emplea para lavar el material ya desprendido por el aire.

Todas estas consideraciones fueron respetadas en el diseño y operación del modelo durante la investigación. Únicamente el espesor se disminuyó ligeramente a 1.15 m. por limitaciones de la columna disponible.

4.3.2. Tasas de Filtración.

Tomando en consideración que las tasas de filtración o velocidades de filtración son similares en los filtros profundos y en los filtros americanos, ambas columnas serán operadas empleando la misma tasa y manteniéndola constante durante el tiempo que dure una carrera de filtración. Para la investigación a este variable se le asignan dos

valores diferentes a saber:

- Tasa alta de filtración de 6 lps./m² (8.8 gpm/pie²)
- Tasa convencional de filtración de 3.4 lps/m² (5 gpm/pie²)

Los valores anteriores se seleccionaron principalmente en base a recomendaciones dadas por Russell L. Culp (Re. # 2), los cuales además se corroboraron en otros trabajos de investigación y datos de plantas de filtración directa actualmente en operación. Se pretende con ellos observar variaciones, no sólo en el mismo filtro al cambiar la velocidad de aproximación, sino también de un filtro a otro, detectando la eficiencias respectivas en el proceso de filtración para un agua de características dadas (turbiedad y tratamiento químico).

4.3.3. Tratamiento Químico

Es de capital importancia para el desarrollo de la presente investigación y en general para el proceso de filtración directa, el definir adecuadamente el tipo de floculante a examinar, la dosis y el tiempo e intensidad del mezclado.

Es criterio general de diversos investigadores que el tipo de coagulante o floculante empleado es el parámetro químico más importante en la filtración en lechos porosos y es considerado por A. Adin, Cleasby y otros como el factor primario del diseño de un experimento que emplee filtros piloto.

El primer paso en este sentido sería la selección del coagulante a emplear, para posteriormente, evaluar el rango de dosis apropiadas que provean una mejor eficiencia y calidad del filtrado para condiciones específicas de turbiedad, tasa de filtración y características del lecho.

En decir con> condición indispensable para la experimentación, deben efectuarse pruebas preliminares para escoger el coagulante y las dosis de aplicación más adecuadas.

Para definir el coagulante o combinación de ellos a emplear, deben tenerse en cuenta una serie de consideraciones muy importantes.

Si la filtración contacto o filtración directa se efectúa, únicamente dosificando sales de Aluminio o Hierro, el proceso no es eficiente a altas tasas de filtración especialmente si se emplea un medio grueso. Ocurre un rompimiento o aparición de floc y deterioro del efluente más rápidamente, producto de la debilidad de las fuerzas de adhesión. En investigación efectuada por Adin y Rebhun (Ref. # 4), se llegó a determinar que la coagulación en filtración directa empleando únicamente Sulfato de Aluminio, sólo resultó eficiente empleando tasas de filtración bajas, entre 1.4 y 2.8 lps/m². y un medio grueso; arriba de 0.6 mm. de tamaño de grano.

Aún cuando el alumbre ha sido usado por muchos años como un floculante eficiente para el caso de los procesos convencionales de tratamiento, en realidad el floc que forma es débil y muchas veces incapaz de resistir los altos esfuerzos cortantes existentes dentro del lecho filtrante. Si no se emplean polielectrolitos, los incrementos en los tamaños del medio filtrante, en las tasas de filtración e inclusive aumento en las dosis de alumbre aplicada, producen un rápido avance del floc dentro del lecho filtrante, para posteriormente ser desplazado del mismo, ocurriendo la ruptura y deterioro de la calidad del efluente. Por otro lado, empleando polielectrolitos en dosis adecuadas, se logra incrementar la dureza del floc, tal que al avanzar la carrera de filtración y aumentar los esfuerzos de corte dentro del lecho, éste no se destruya y se densifique a una mayor profundidad para ser luego, fácilmente expulsado del lecho, apareciendo en el efluente.

En la actualidad los polímeros sintéticos se emplean cada vez más, lo cual hace más patente la necesidad de una mayor investigación para definir claramente los mecanismos físicos y químicos que intervienen, así como encontrar un método científico para su aplicación a la filtración de alta tasa.

Los polímeros o polielectrolitos, dependiendo de su tipo, pueden ser utilizados como coagulantes primarios o bien como ayudantes de coagulación acompañando a sales de aluminio o hierro.

Una posibilidad es utilizar alumbre más polielectrolito no iónico, sin embargo no hay evidencia suficiente para preferirlo sobre otras combinaciones. Si se utiliza el polímero como ayudante, se puede emplear además del no iónico, un polímero ligeramente aniónico o bien catiónico.

La combinación Sulfato de Aluminio y polielectrolito catiónico ha sido bastante probada y rinde resultados satisfactorios.

Por otro lado cuando el polielectrolito es utilizado como coagulante primario suele preferirse el polímero catiónico. En general se puede afirmar que los polímeros catiónicos mejoran la penetración del floc dentro del lecho superando, en éste, a los no iónicos o aniónicos.

En los procesos de contacto los polielectrolitos catiónicos son eficientes a altas tasas de filtración, causando fuerzas de adhesión apreciables entre la materia removida y el lecho.

V. L. Stump y J. T. Novak en estudio efectuado relativo al tema (Ref. # 11) llegan a algunas conclusiones similares afirmando inclusive, que los polímeros catiónicos son superiores a los no iónicos en filtración directa y descartan los aniónicos, por producir, en muchos casos, resultados no satisfactorios.

Por otro lado enfatizan la importancia del peso molecular y la energía aplicada a la mezcla. En general recomiendan polímeros catiónicos con pesos moleculares entre 10.000 y

200.000 y con intensidad de mezcla superior a los 300 seg¹.
Basado en todo lo anterior, se establecen dos condiciones diferentes respecto a los coagulantes a emplear en la experimentación.

- condición de dosificación A
empleo de polielectrolito catiónico únicamente ; y
- condición de dosificación B
empleo de Sulfato de Aluminio y polielectrolito catiónico como ayudante de coagulación.

Antes de iniciar una carrera de filtración cualquiera, para alguna de las condiciones de dosificación establecidas, se determinará previamente, la dosis de coagulantes a emplear mediante procedimiento que se explica en el Anexo.

4.3.4. Propiedades del medio

La selección del medio filtrante puede estar basada en el grado de purificación requerido en el proceso de filtración

así como en la durabilidad del medio. Otros factores que también son condicionados por el tipo de medio elegido, son la duración de la carrera de filtración, así como la facilidad y economía en el proceso de lavado del material filtrante.

Antiguamente la tendencia era el uso de medios de graduación de fina a gruesa en la dirección del filtrado. En la actualidad, por el contrario, los medios son de graduación invertida, de gruesa a fina, tales como los medios duales arena-antracita o los medios múltiples. En estos casos se presenta la gran ventaja de que los sólidos suspendidos se distribuyen más uniformemente a través de toda la profundidad del lecho, pudiendo retener el filtro un mayor volumen de material, aumentando su capacidad de almacenamiento.

En el pasado los esfuerzos se centraban, dadas las limita-

ciones inherentes a la graduación del lecho, a lograr una adecuada sedimentabilidad de la materia suspendida. En los filtros modernos de graduación invertida, con el uso de medios combinados y con la aparición de polielectrolitos aplicados como coagulantes o ayudantes de coagulación, la atención se ha enfocado principalmente a los procesos de coagulación y floculación.

En general el medio filtrante debe cumplir tres requisitos básicos:

- retener la máxima cantidad de sólidos suspendidos;
- proveer un efluente de buena calidad; y
- ser limpiado adecuadamente

En cuanto al tamaño ideal del medio, revisando la literatura, se encuentra que pareciera no haber un único criterio.

Según Kawamura (Ref. #3) la arena es el medio más económico y el de grano fino produce mejores calidades de efluente que el

medio grueso. Por otro lado el medio fino presenta el inconveniente de que por sí solo, no provee una carrera de filtración de duración adecuada en condiciones convencionales. Al contrario, la arena gruesa sí produce carreras o ciclos de filtración más largos y aún cuando existe una relación inversa entre tamaño del grano y calidad del filtrado, éste puede mejorarse con un pretratamiento empleando polielectrolitos.

Las anteriores apreciaciones parecen coincidir con el criterio de R. L. Culp (Ref. #2) quien recomienda el uso del mínimo tamaño de grano aceptable, desde la perspectiva de utilizar menores cantidades de productos químicos.

También afirma que, dentro de ciertos límites, medios filtrantes gruesos, pueden producir la misma calidad de filtrado; dado que la utilización de altas dosis de polímeros incrementa la resistencia a los esfuerzos cortantes del floc, promoviendo su adherencia a la superficie de los granos del medio.

Con cierto criterio los investigadores Añin y Rebbun (Ref. # 4) indican que para aguas de baja turbiedad es recomendable la filtración directa y que para acompañar a ésta, se debe tener un gran diámetro de grano para disminuir la pérdida de carga con una dosificación adecuada de polielec-trolitos, para lograr una fuerte adhesión de las partículas a los granos y aprovechar, de una manera óptima, la capacidad del lecho.

Los filtros de lecho profundo, principalmente utilizados en Europa y otros países, presentan medios de arena gruesa, generalmente comprendida entre 0.5 a 2.0 mm. de diámetro de partícula en lecho de 1.22 a 1.83 m de profundidad.

Jung y Savage (Ref. # 12) mencionan en América, como ejm. de plantas de filtración, que emplean filtros profundos de un medio único constituido por arena gruesa, el caso de la Planta de Reynosa en México con arenas de 1.2 a 2.2 mm. de diámetro de partículas y lecho de 1.52 m. de profundidad.

También indican el caso de la planta de filtración del río Ohio, la cual presenta un medio filtrante único de arena con un tamaño efectivo de 1.2mm. y un coeficiente de uniformidad de 1.3. También opera como filtración directa y el agua del río es bombeada directamente a los filtros previa dosificación de 1 mg./l de polielectrolito catiónico dentro del lecho.

En base a todo lo anterior, se procuró empaquetar a la columna de filtración # 1 con un medio dual de arena-antracita, cuyas características granulométricas fueran típicas dentro de lo que ha sido la práctica americana en filtración directa. El material filtrante de la columna de filtración # 2 está constituido únicamente por una arena gruesa de granulometría acorde con lo que ha sido aplicado más intensivamente en Europa y respetando las recomendaciones de H. Jung y E. Savage en su artículo "Deep-Bed Filtration" (Ref. #12)

Las características de los materiales de ambos filtros se

indican en el capítulo V del presente trabajo.

4.3.5. Requerimientos de retrolavado

Las técnicas de retrolavado americana y europea presentan diferencias sustanciales, las cuales se consideran en el diseño del experimento.

En la práctica americana, por lo general, sólo se emplea agua y los requisitos del retrolavado se establecen en base a la expansión deseada del lecho filtrante y tomando en consideración la granulometría de los materiales constituyentes del medio, así como la temperatura media del agua a filtrar.

La práctica europea utiliza, además del agua, la aplicación de aire en forma ascendente y no se busca la expansión del lecho filtrante. El aire juega el papel principal desmenuando el floc y material retenido en el lecho. El agua aplicada posteriormente busca lavar y expulsar del lecho

el material ya desprendido. En este caso se necesita menos agua de retrolavado pero, dado que el floc penetra a una mayor profundidad, se requiere suplir una alta energía en el proceso.

La secuencia de retrolavado a seguir en el filtro de diseño europeo, será la aplicación de aire y agua simultáneamente durante 15 minutos y finalmente la aplicación de agua únicamente a una tasa menor, durante 15 minutos.

Para el filtro de diseño americano, se lavará únicamente con agua durante un período de 15 minutos.

Dado que el análisis del proceso de retrolavado para ambos filtros no es un objetivo planteado en la presente investigación, únicamente lo que se persigue con el mismo es lograr un lavado eficiente de los lechos a efecto de acondicionarlos debidamente para las carreras de filtración subsiguientes. Para cumplir con lo anterior se efectuarán las pruebas que se consideren necesarias.

4.4. Parámetros a determinar

Las variables experimentales mencionadas en el aparte anterior deben ser evaluadas, acorde con su influencia en ciertos parámetros, los cuales serán determinados a lo largo de cada ciclo de filtración, a efectos de cumplir con el objetivo de comparar y analizar el comportamiento de dos diferentes lechos filtrantes. Dichos parámetros son:

4.4.1. Capacidad de retención del filtro

La capacidad de retención del filtro o depósito específico último se expresa mediante el coeficiente de filtración, el cual es un índice de la eficiencia de la filtración.

Si es determinado en las diferentes profundidades del lecho nos indica el frente de avance del material removido del lecho y la capa de trabajo del medio en un tiempo dado.

Es necesario por tanto la toma de muestras de turbiedad influente y efluente para cada estrato o capa del lecho.

4.4.2. Capacidad hidráulica del filtrado

La capacidad hidráulica del filtrado se determina evaluando la cantidad de agua que pasa a través del lecho, antes de que se deteriore la calidad del efluente a una profundidad dada, o bien, la cantidad de agua producida antes de que se alcance la pérdida de carga límite, también para una profundidad específica.

La determinación de este parámetro, para una combinación dada de variables, permitirá también comparar el comportamiento de los dos medios filtrantes.

4.4.3. Gradiente Hidráulico

Se refiere a la evaluación de la tasa de desarrollo de la pérdida de carga por unidad de profundidad del lecho conforme avanza el ciclo o carrera de filtración. Las pérdidas de carga se determinan a intervalos regulares de tiempo y a diferentes profundidades.

La tasa de pérdida de carga permitirá concluir con respecto al comportamiento de los lechos filtrantes y podrá ser ex-

presada en función del tiempo o bien con respecto al volumen filtrado para una profundidad dada del lecho.

4.4.4. Duración del ciclo de filtrado

La duración del ciclo de filtrado es un parámetro importante al evaluar el comportamiento de un filtro. Se define como la duración de una carrera de filtración desde el instante en que se inicia la misma hasta el momento en que ésta tiene que detenerse producto de dos circunstancias:

- 1- deterioro de la calidad del efluente ("breakthrough"); y
- 2- se alcanza la máxima pérdida de carga permisible .

La ocurrencia de los dos fenómenos simultáneamente o de cualquiera de ellos (el que se presente primero), da la pauta para interrumpir el proceso y dar por terminada la carrera de filtración.

En base a lo que ha sido práctica común en este tipo de experiencias con filtros piloto se definen las condiciones ter-

minales para un ciclo de filtrado, como recomendación para la futura operación de las columnas:

- a- cuando se alcance una turbiedad del efluente de 1 NTU, y
- b- cuando la pérdida de carga llegue al valor del límite de 2.0 m.

La condición que se presente primero define el fin de una carrera de filtración.

4.5 Pruebas o carreras de filtración a efectuar

En base a los valores asignados a las variables experimentales y considerando todas las posibilidades de combinación se define el tipo y número de pruebas de filtración a efectuar, en el desarrollo de esta investigación, para lograr los objetivos propuestos.

Como ya se mencionó las dos columnas de filtración se operarán en paralelo con las características del lecho fijas, constiéndose ambas, a las mismas condiciones de prueba.

En el Cuadro #1 aparece el diseño de las carreras de filtración, indicándose el número de la prueba y las magnitudes fijadas para las variables que intervienen.

CUADRO N° 1 DISEÑO DE PRUEBAS DE FILTRACION

PRUEBA NUMERO	TIPO DE AGUA	TASA DE FILTRACION	CONDICION DE DOSIFIC.
1	I	ALTA	A
2	I	ALTA	B
3	I	NORMAL	A
4	I	NORMAL	B
5	II	ALTA	A
6	II	ALTA	B
7	II	NORMAL	A
8	II	NORMAL	B
9	III	ALTA	A
10	III	ALTA	B
11	III	NORMAL	A
12	III	NORMAL	B
<u>AGUA TIPO I</u> : Turbiedad 10 NTU.		<u>TASA DE FILTRACION ALTA (1)</u> 6 lps / m ²	<u>CONDICION DE DOSIFICACION A</u> Solo polielectrolito catiónico <u>CONDICION DE DOSIFICACION B</u> Sulfato de aluminio y polielectrolito catiónico.
<u>AGUA TIPO II</u> : Turbiedad 20 NTU.		<u>TASA DE FILTRACION (2)</u> 3.4 lps / m ²	
<u>AGUA TIPO III</u> : Turbiedad 100 NTU.			

V EQUIPO EXPERIMENTAL Y MATERIALES

El filtro piloto, diseñado para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente, consiste de dos columnas a escala piloto para simular el proceso de filtración directa, empleando un agua sintética con diferentes turbiedades, dosificando coagulante de aluminio y un polielectrolito catiónico y operando con un rango definido de tasas de filtración. El modelo de Laboratorio presenta los siguientes componentes:

- tanques de almacenamiento de la suspensión;
- tanque de carga constante ;
- columnas de filtración;
- materiales filtrantes;
- tanques calibrados para aforo volumétrico ;
- alimentación de agua y aire; y
- sistema de drenaje

En la Figura # 1 se presenta una vista en perspectiva de la instalación experimental. En la misma se incluye un detalle de las conexiones de entrada, salida y drenaje de las columnas de filtración.

En la Fig. # 2 se muestra la denominada "columna de filtración # 1" cuyo lecho filtrante fue diseñado en base a la práctica americana. Se indican espesores y características del lecho así como ubicación de piezómetros y orificios para muestreo de turbiedad.

En la misma se muestra la denominada "columna de filtración # 2" con diseño de lecho basado en la práctica europea. También se aprecian los diferentes piezómetros y puntos de muestreo.

A continuación se describen los diferentes elementos componentes de los filtros:

Tanque de almacenamiento de la suspensión

Consiste de dos tanques de asbesto-cemento, elevados para su operación por gravedad de 1 m³ de capacidad, los cuales contienen la suspensión coloidal a ser filtrada con la dosis apropiada de coagulante para cada ciclo de filtrado. La agitación o mezcla de la suspensión se efectúa por medio de la inyección de aire a presión, el cual cumple además la función de no permitir la deposición de las partículas mayores de arcilla antes de que el agua sintética sea filtrada. El coagulante es agregado posteriormente, a la salida de los tanques y antes de la entrada a filtros.

Tanque de carga constante

Tanque de menor capacidad, ubicado entre los depósitos elevados de almacenamiento y las columnas de filtración. Cumple básicamente dos objetivos:

- brindar la carga adecuada para la operación por gravedad de los filtros en paralelo; y

- mantener una carga constante de agua sobre las columnas, con la idea de mantener un gasto influente y tasa de filtrado invariables durante el tiempo que dure un ciclo de filtración. Lo anterior se logra mediante un vertedero de rebosa que mantiene constante el nivel del agua. Dicho dispositivo podría ser mejorado de acuerdo a esquema mostrado en Fig. # 3.

Columnas de Filtración

Son dos columnas fabricadas en fibra acrílica, con 5 mm. de espesor del material y sección cuadrada libre de 0.15 X 0.15 m. una y de 0.125 X 0.13 m. la otra. La altura total de ambas es de 2.11 m. y 1.97 m. respectivamente. Un detalle de las mismas se aprecia en la Fig. # 2 ya mencionada. Según se vio en la Fig. # 1 cada columna presenta conexiones para influente de agua a filtrar, efluente de agua filtrada, entrada de agua y aire para retrolavado del lecho filtrante y drenaje general.

FIGURA N° 1

- NOTACION**
- N°1. ALMACENAMIENTO Y PREPARACION DE AGUA PROBLEMA
 - N°3. EDUJION DE CONSULTANTES
 - N°4. BOMBA DOSIFICADORA
 - N°5. TANQUE DE CARGA
 - N°6 y 7. COLUMNAS DE FILTRACION
 - N°8, 9. TABLEROS CON FLEXIONETROS
 - N°10. APORTE DE GASTO DE RETROALIMANTO
 - N°11, 12. APFIDOS DE CAUDALES ENTRADOS

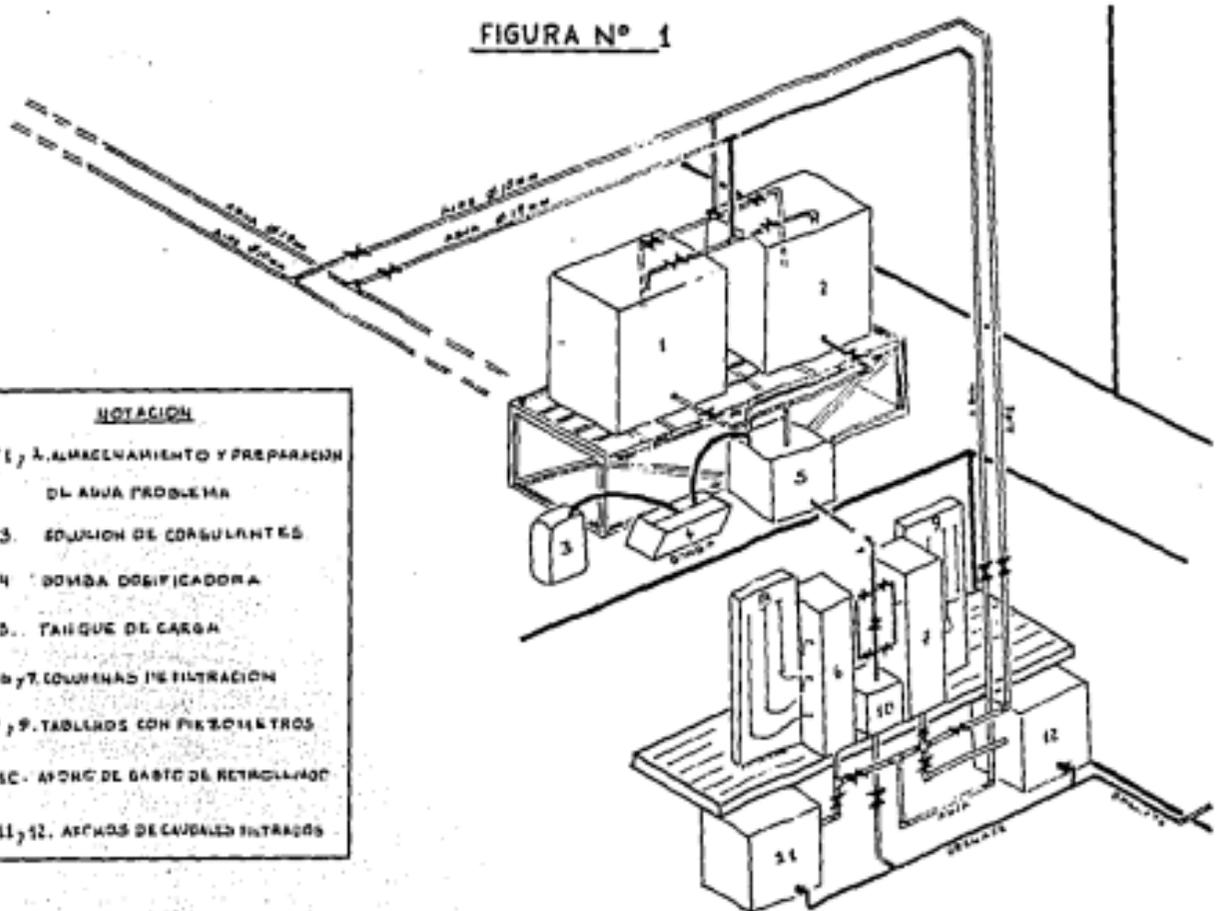


FIGURA N°2
COLUMNAS DE FILTRACION

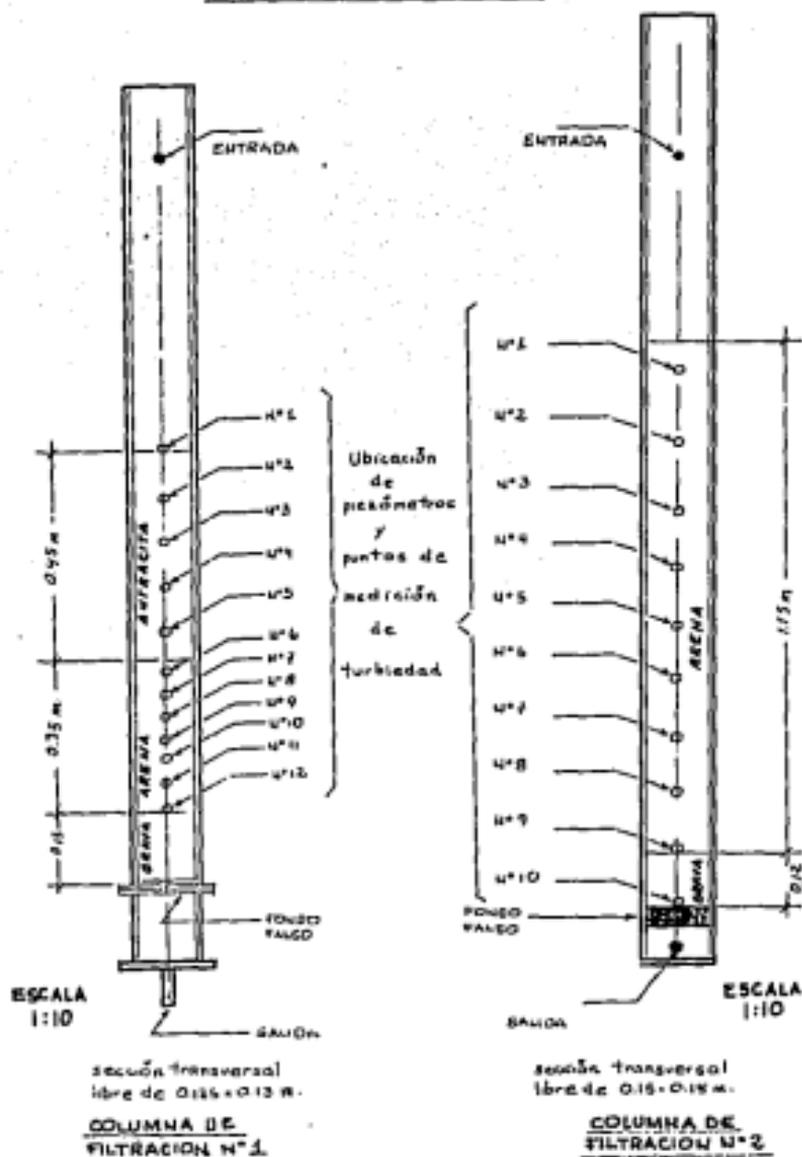
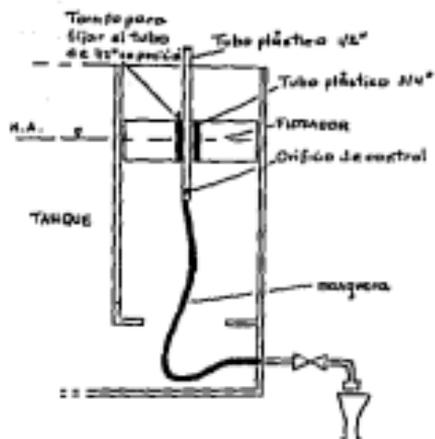


FIGURA N° 3
SISTEMA DE CONTROL DE GASTO (REF. N°14 -)



Materiales Filtrantes

La columna de filtración # 1 fue empacada con un medio dual (arena-antracita), soportado en un lecho de grava y un fondo falso consistente de una lámina plástica con orificios y recubierta con un tamiz.

En el cuadro # 2 se presentan las características y espesores de los materiales filtrantes utilizados en dicho filtro. Los mismos, se procura, sean representativos de condiciones estándar o típicas de lo que ha sido hasta el momento la práctica americana en el diseño de lechos duales para filtración directa de alta tasa. Para ello se consultó investigaciones efectuadas por George E. Sweeney y Paul W. Prendiville utilizando filtros piloto para diseño de ampliación de Planta de filtración directa para la ciudad de Springfield, Mass. U.S.A. (Ref. # 13) ; estudio piloto efectuado por W. Hutchison y P. D. Foley para convertir va-

rias Plantas canadienses a filtración directa (Ref. # 7); estudios de filtración directa para tratar agua del Lago Ontario efectuados por R. G. Tredgett (Ref. # 8) y experiencias de Charles M. Spink y J. T. Monsewitz en la evaluación de la Planta de Tratamiento Alfred Merrit Smith, componente del Southern Nevada Water System (Ref. # 9)

CUADRO # 2

Materiales Filtrantes Componentes de la Columna # 1. Diseño Estándar según práctica americana.

Material	Espesor del lecho cm.	Tamaño Efectivo mm.	Coefficiente de Uniformidad.
Antracita	45	0.88	1.53
Arena	35	0.45	1.64

La Columna de filtración # 2 fue empacada con un medio único consistente de arena gruesa, grava y un fondo consistente de una losa de piedras pequeñas unidas con cemento y otros agregados.

En el Cuadro # 3 se muestra las características del material filtrante. El mismo fue seleccionado tratando de reflejar condiciones de diseño de filtros atinentes a lo que ha sido práctica aplicada principalmente en países europeos y se basa en el artículo "Deep-Bed Filtration" de Helmut Jung y E. S. Savage (Ref. # 12).

CUADRO # 3

Material filtrante Componente de la Columna # 2 . Diseño según práctica europea.

Material	Espesor del lecho cm.	Tamaño efectivo mm.	Coefficiente de Uniformidad
Arena Gruesa	1.15 mt.(1)	1.07	1.4

(1) El espesor del lecho de 1.15 m. fue seleccionado por

estar cercano al límite mínimo de espesores recomendados para este tipo de filtros. Rango 4 a 8 pies (1.21 a 1.83 mt.)

Tanques calibrados para aforo volumétrico

Tienen el propósito de efectuar mediciones de los caudales empleados en el agua de lavado así como un control de la tasa de filtración y volumen producido durante un ciclo o carrera de filtración (ver Fig. #1)

Alimentación de agua y aire

De las líneas de agua y aire existentes se derivaron dos líneas paralelas con múltiples propósitos:

- llenado de tanques de almacenamiento de 1 m^3 para luego agregar la arcilla;
- agitación con aire de la suspensión;

- lavado con aire y agua del lecho tipo europeo ; y
- lavado con agua del lecho, diseño americano.

Sistema de drenaje

Diseñado para recolectar tanto el efluente del filtrado como las aguas de desecho del lavado.

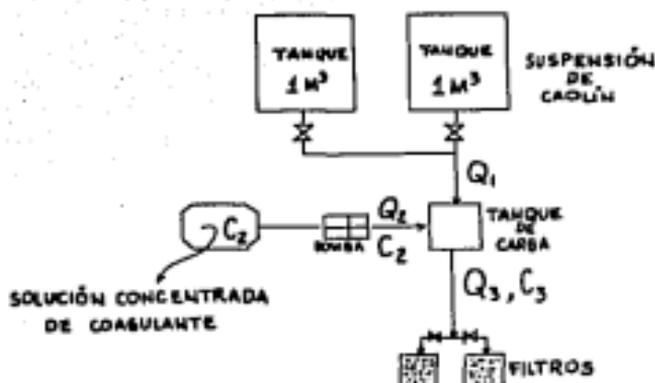
Sistema de dosificación

Consiste de un recipiente donde se almacena la solución concentrada de coagulante en agua.

De aquí se bombea con una bomba peristáltica dosificadora, un gasto controlado al tanque de carga, donde ocurre la mezcla rápida con el agua sintética proveniente de los recipientes de 1 m³.

De inmediato el flujo total de agua con coagulante, se distribuye proporcionalmente a las dos columnas filtrantes de acuerdo a su sección transversal, para obtener en ambas, la misma tasa de filtración.

Para definir el gasto necesario a bombear, así como la concentración necesaria del coagulante, se plantea el siguiente esquema:



Q_1 = gasto de Lps. a ser suministrado por el tanque que se encuentre en operación.

Q_2 = gasto en Lps. dado por la bomba dosificadora.

Q_3 = gasto total en Lps. necesario para obtener en ambos filtros la tasa de filtración requerida.

C_1 = Concentración de coagulante necesaria en mg/l.

C_3 = dosis de coagulante requerida en mg/l., adecuada para las condiciones de la carrera de filtración.

Estableciendo un balance de masa tenemos:

$$Q_1 \cdot 0 + Q_2 \cdot C_2 = Q_3 \cdot C_3$$

$$\text{donde } Q_3 = Q_1 + Q_2$$

entonces,

$$Q_2 \cdot C_2 = (Q_1 + Q_2) \cdot C_3$$

$$C_2 = \frac{(Q_1 + Q_2) \cdot C_3}{Q_2}$$

CAPITULO VI PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

6.1 Preparación del medio filtrante

Para ambas columnas de filtración se criba, selecciona y determinan las propiedades físicas y granulometría de los medios filtrantes utilizados, a saber, arena media y antracita en la Columna de Filtración # 1 y arena gruesa en la Columna de Filtración # 2.

Una vez obtenido el material de diversas fuentes, se clasifica empleando mallas de abertura estandarizada y correspondientes a la Serie Americana de Tamices (Estados Unidos)

Se emplea un equipo para el vibrado de accionamiento eléctrico, con juego adecuado para cada material a tamisar.

Los números de las mallas se presentan a continuación en el Cuadro # 4

Cuadro # 4 Tamices Emplendos

Material Filtrante	Número de Tamiz (Serie Estándar U.S.)
Antracita	# 8, 10, 20, 40, 60
Arena Media	# 4, 8, 10, 20, 40, 60, 70, 80, 100
Arena Gruesa	#10, 16, 18

Después de vibrar y tamizar el material, se pesan y pesan los retenidos en cada malla. Posteriormente se comparan las características granulométricas, definidas con antelación para los diferentes materiales, con el análisis obtenido para el material natural. Si no hay mucha diferencia, se utiliza el material disponible, sin sufrir ninguna alteración para empacar la columna respectiva. En caso de que sí la hubiera, se elabora la granulometría del material de acuerdo a las características deseables del mismo, aprovechando el ya existente.

6.2 Análisis y Propiedades Granulométricas

El análisis granulométrico se efectúa de acuerdo a recomendaciones de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (Ref. #16) y Fair, Geyer, Okun (Ref. #17).

6.2.1. Análisis de la arena media (Columna de Filtración # 1)

Del banco de arena natural disponible se efectúa el análisis granulométrico presentado en el Cuadro # 5

Cuadro # 5Análisis Granulométrico de Arena Mediana NaturalColumna de Filtración # 1

# de Malla	Abertura	Peso Rete- nido	% Rete- nido.	% que pasa acumulado
4	4,760	0	0	100,00
8	2,380	30	0,16	99,84
10	2,000	208	1,06	98,78
20	0,840	5422	27,74	71,04
40	0,420	12778	65,38	5,66
60	0,250	972	4,97	0,69
70	0,210	73	0,37	0,32
80	0,180	7	0,04	0,28
100	0,150	54	0,28	0,00

En base a los datos del Cuadro anterior, se grafica el número y abertura de la malla en las abscisas y el % del material en peso que pasa, en las ordenadas. La curva ob-

tenida se muestra en la Fig. # 4 .

De la curva granulométrica se obtienen los tamaños correspondientes al 10,30 y 60 % que pasa el tamiz.

Entonces,

$$D_{10} = 0,45 \text{ mm.}$$

$$D_{30} = 0,56 \text{ mm.}$$

$$D_{60} = 0,74 \text{ mm.}$$

De acuerdo con Hazen, el tamaño efectivo del material T.E. corresponde a D_{10} o sea que,

$$T.E. = 0,45 \text{ mm.}$$

El coeficiente de uniformidad C. U. , se da en base a la siguiente relación

$$C.U. = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ , por tanto } C. U. = \frac{0,74}{0,45} = 1,64$$

Badillo y Rodríguez (Ref # 16) , mencionan además el denominado coeficiente de curvatura del suelo, de acuerdo a la

expresión:

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

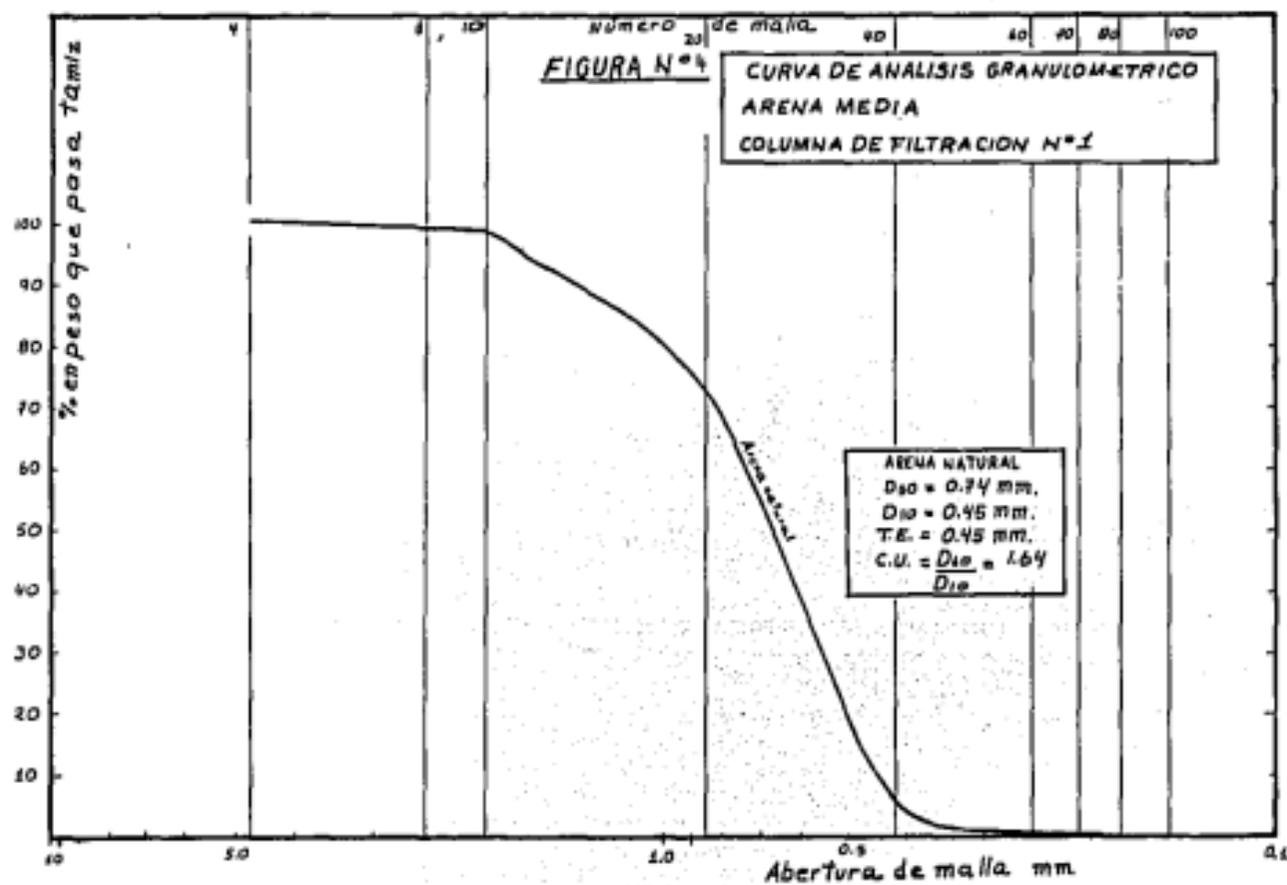
Entonces,

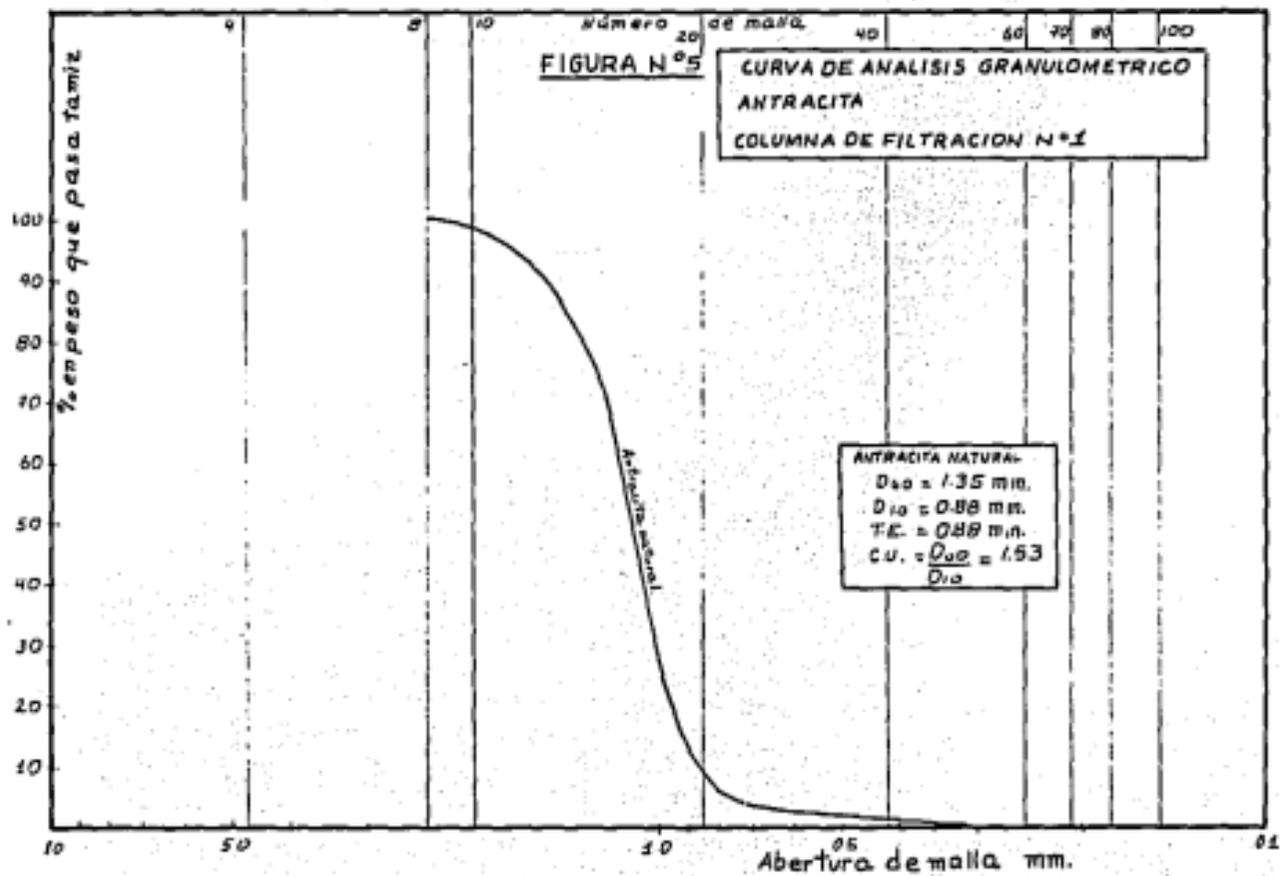
$$Cc = \frac{(0,56)^2}{0,74 \times 0,45} = 0,94$$

Un valor de Cc entre 1 y 3 corresponde a suelos bien graduados, con amplio margen de tamaño de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

Se observa que se tiene, para la arena natural, un tamaño efectivo de 0,45 mm. y un coeficiente de uniformidad de 1.64. Dichos valores resultan comunes en la práctica americana y se encuentran dentro de los rangos usuales de diseño.

Por lo anterior, se decide utilizar la arena sin modificación, para empaquetar la Columna de Filtración # 1.





6.2.2. Análisis de la antracita (Columna de Filtración # 1)

Del banco de antracita disponible, se efectúa el análisis granulométrico presentado en el siguiente Cuadro # 6 .

Cuadro # 6

Análisis Granulométrico de la Antracita Natural

Columna de Filtración # 1

# de Malla	Abertura mm.	Peso rete- nido. gr.	% Rete- nido.	% que pasan acumulado.
8	2,380	0	0	100
10	2,000	54,5	0,57	99,43
20	0,840	88,11	92,77	6,66
40	0,420	606,5	6,38	0,28
60	0,250	27,0	0,28	0,00

En base a los datos del Cuadro anterior, se grafica el número y abertura de malla en las abscisas, y el % del ma-

terial en peso que pasa, en las ordenadas. La curva obtenida se muestra en la Fig. # 5 .

Obtenidos de la curva granulométrica, tenemos los siguientes tamaños:

$$D_{10} = 0.88 \text{ mm.}$$

$$D_{40} = 1.35 \text{ mm.}$$

$$D_{100} = 1.17 \text{ mm.}$$

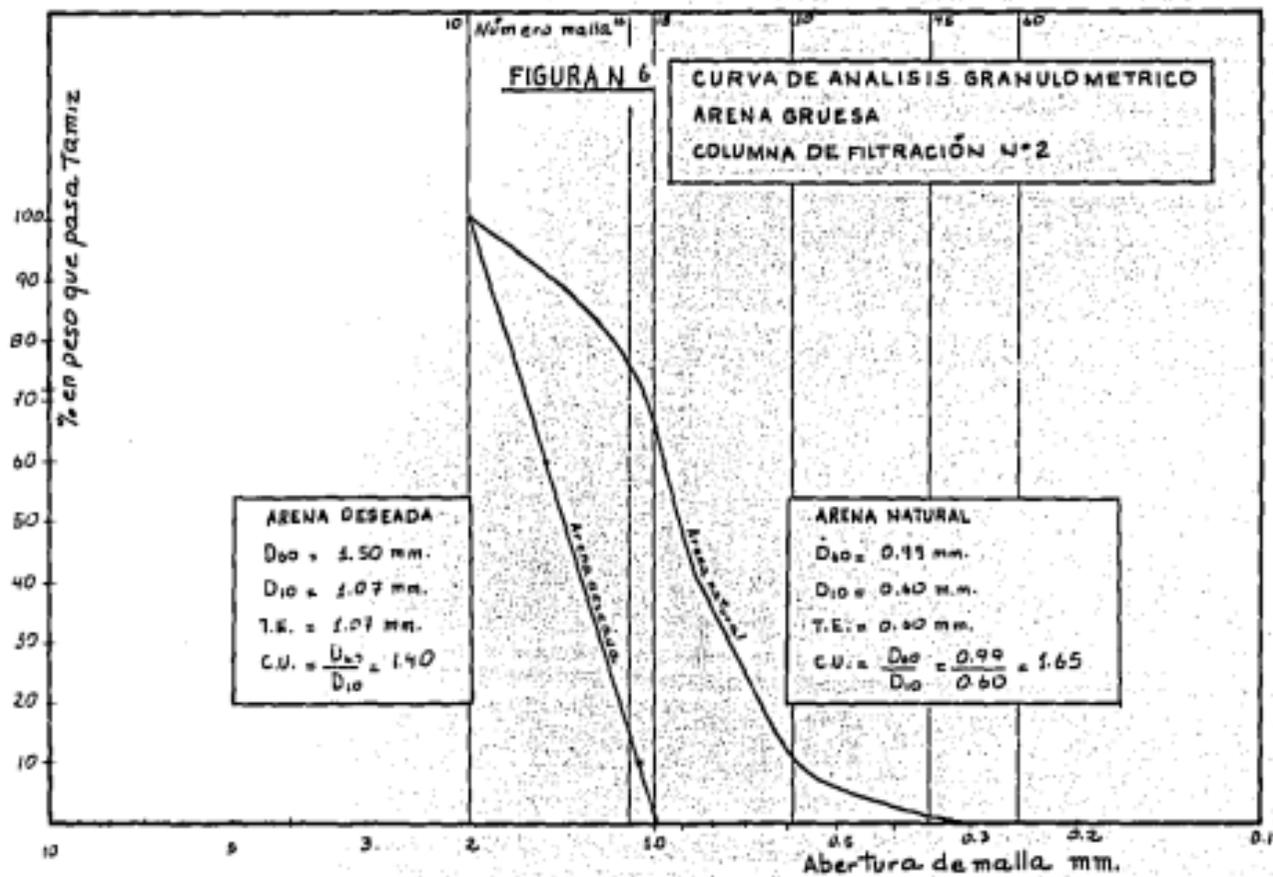
De los valores anteriores y de acuerdo a procedimiento descrito en el apartado anterior (6.2.1.)

$$T.E. = 0.88 \text{ mm.}$$

$$C. U. = \frac{1.17}{0.88} = 1.33$$

$$C_c = \frac{(1.35)^2}{1.17 \times 0.88} = 1.77$$

Los valores anteriores resultan aceptables de acuerdo a la práctica americana y cercanos a los rangos usuales de diseño para dichas circunstancias. Por tanto se decide uti-



lijar dicho material, sin alteración, para componer el medio dual de la Columna de Filtración # 1.

6.2.3. Análisis de la arena gruesa (Columna de Filtración #2)

El material natural, disponible para espacar la columna de filtración # 2, después de un análisis granulométrico previo, se comprueba que no resulta adecuado para ser utilizado, sin alteración y tal como fue suelido, para espacar dicho filtro.

Se opta, por tanto, en cribar y seleccionar el material de acuerdo a requisitos granulométricos definidos con antelación.

En base a un tamaño efectivo de 1,07 mm. y un coeficiente de uniformidad de 1.42, se obtienen los datos presentados en el Cuadro # 7, los cuales se derivan a su vez de la curva granulométrica presentada en la Fig. # 6. En la misma se presentan y comparan las curvas del material natural

y del material deseado para empujar el filtro

Cuadro # 7

Análisis Granulométrico para la Arena Gruesa Requerida

Columna de Filtración # 2

# de malla	Abertura de malla (mm.)	% Retenido	% que pasa acumulado.
10	2,000	0	100
16	1,190	83	17
18	1,000	17	0

Se tiene entonces, para el material de la Columna de Filtración # 2, definidas las características siguientes:

T.E. = 1,07 mm.

C.U. = 1,42

Cc = 0,93

6.3 Determinación de las propiedades físicas de los medios
filtrantes

Para cada uno de los medios filtrantes empleados se determinan los siguientes parámetros, los cuales definen las características físicas más importantes de los mismos, a saber:

- a) Peso específico
- b) Porosidad
- c) Esfericidad

En cuanto al peso específico se refiere, se cree conveniente determinar, tomando para cada medio filtrante, una sola muestra constituida por todos los retenidos obtenidos del análisis granulométrico, en la misma proporción en que estos se encontrarían en la columna empacada.

La porosidad se calcula tomando en consideración las carac-

terísticas del material ya ubicadas en la columna y se deriva del peso específico, calculándose la correlación para la muestra compuesta.

La esfericidad se calcula empleando un procedimiento indirecto y muy aproximado. Únicamente en el caso que se refiere a la esfericidad, se evalúa para las submuestras en mayor cantidad. Es decir para los tres diferentes materiales a saber, arena medía y antracita para la columna de filtración # 1 y arena gruesa para la columna de filtración # 2, se calcula la esfericidad para las submuestras en las cribas, que resulten ser más representativas en cuanto a magnitud se refiere.

Luego de estas consideraciones se determinan rápidamente se entra al detalle de los procedimientos empleados en la determinación de cada uno de los submuestreos.

a) Peso Específico

La determinación del peso específico o densidad de sólidos para un suelo no cohesivo se efectúa de acuerdo a procedimiento usual en la Mecánica de Suelos (Ref. # 18), y representado en el Anexo (Procedimiento IV). Los resultados se muestran en el Cuadro # 8.

Cuadro # 8

Resultados del Peso Especifico

Material	Columna de Filtración	Peso específico para la muestra compuesta, Kg/m ³
Arena media	# 1	2.621
Antracita	# 1	1.767
Arena gruesa	# 2	2.657

b) Porosidad

Como ya se mencionó la porosidad se deriva del peso específico y tomando en cuenta la configuración del material en las columnas de filtración. Por tanto su determinación es indirecta y el valor obtenido corresponde al de una muestra compuesta, con las características indicadas en el cálculo del peso específico.

Se emplea la siguiente relación (Ref. # 1)

$$\eta = \frac{1000 - W}{L Ss}$$

en donde,

η = porosidad

L = altura del lecho (m)

W = Peso de arena / Área transversal del filtro (Kg/m²)

Ss = Peso específico de la arena (Kg/m³)

Los cálculos se resumen en el Cuadro # 9 presentado.

Aplicando la relación anterior y simulando las condiciones existentes en el filtro respectivo en una probeta graduada de 1000 ml., a la cual se ha vertido el material filtrante, con las condiciones de estratificación y granulometría correspondientes, se obtienen las porosidades mostradas en el Cuadro # 9 .

Cuadro # 9

Porosidades de los Materiales filtrantes

Material Filtrante	Columna de Filtración #	Porosidad
Antracita	1	0.47
Arena Media	1	0.38
Arena Gruesa	2	0.40

c) Esféricidad

En lo referente al parámetro esféricidad no es posible hablar de un procedimiento único ni exacto para su cuantificación. En este sentido, por tanto, toda determinación resultará ser una mera aproximación, la cual no podría tomarse, en modo alguno, como un procedimiento definitivo.

En el Anexo (Proced. V) se indica el procedimiento.

Cuadro # 10Resultados de Esfericidad

MATERIAL	Faja masa Kg	Peso de masa μ	Diámetro - promedio de las dos aberturas cm.	U_0 cm/seg	U_5 cm/seg	φ ESTERECIDAD	P_c
Antracita	8	10	0.219	3.57	1.98	0.48	0.430
	10	20	0.412	4.62	0.83	0.42	0.120
	20	40	0.063	3.53	0.16	0.21	0.010
	40	60	0.033	1.62	0.045	0.17	0.001
Arena Media	8	10	0.219	13.64	4.19	0.55	0.908
	10	20	0.142	15.00	1.76	0.38	0.247
	20	40	0.063	7.5	0.35	0.22	0.022
	40	60	0.033	4.29	0.095	0.15	0.003
Arena Gruesa	10	16	0.159	12	2.257	0.43	0.355
	16	18	0.109	10	1.06	0.33	0.114

En el Cuadro anterior se muestran los resultados obtenidos

6.4 Preparación del agua sintética

6.4.1. Introducción

Un aspecto básico y determinante para el buen éxito de las pruebas de filtración estriba en la utilización de una suspensión coloidal, adecuada para los objetivos planteados de evaluar la eficiencia de dos medios filtrantes de características disímiles.

Dicha suspensión coloidal debe realmente serlo, es decir debe presentar estabilidad durante un período razonable en lo que se refiere, principalmente, a las partículas coloidales suspendidas y su reflejo en el parámetro de turbiedad, utilizado como uno de los controles de la eficiencia del filtrado.

La solución obvia que se plantearía inicialmente sería la utilización de un agua natural de características particulares. En este caso dicha alternativa no resultaría viable,

principalmente por los grandes volúmenes de agua a esplear y la dificultad del abastecimiento durante el período de realización de cada carrera de filtración.

Otro aspecto no menos importante estriba en el hecho de no poder conseguir, con un abastecimiento natural, una turbiedad constante durante todo el desarrollo de una carrera de filtración y por otro lado, no poder probar los filtros, a diferentes turbiedades, de una carrera a otra.

Por todo lo anterior se decide preparar un agua sintética, probando preliminarmente, las condiciones de estabilidad o inestabilidad de diferentes tipos de arcilla en agua de la llave por una parte, y por otra, como punto de referencia, en agua destilada. Esto establecerá un criterio para la selección de la arcilla más adecuada para efectuar las pruebas siguientes, adicionando posteriormente a las suspensiones de arcilla en agua, una serie de compuestos químicos con características dispersantes.

6.4.2. Antecedentes

a- Componentes minerales de las arcillas

Las arcillas están constituidas principalmente por silicatos de aluminio hidratados. También en ciertas ocasiones, se presentan silicatos de hierro, magnesio y otros metales.

La estructura cristalina de estos metales se haya constituida, básicamente por dos tipos de láminas:

- la lámina silícica;
- la lámina aluminica

* La lámina silícica está formada por un átomo de silicio, rodeado por cuatro átomos de Oxígeno y constituyendo, por su formación geométrica, una figura tetraédrica. Estos tetraedros, a su vez, se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo, como enlace entre dos tetraedros, un átomo de

oxígeno. Al repetirse sucesivamente dichos conjuntos hexagonales, llegan a conformar una redícula laminar.

Por otro lado, las láminas aluminicas, están formadas por redículas de octaedros con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor. Similar al caso anterior, el oxígeno constituye el nexo entre dos octaedros vecinos. En base a la estructura reticular que posean los minerales de arcilla, se clasifican en tres grupos principales:

- caolinitas;
- montmorilonitas; y
- ilitas

Las caolinitas, de composición $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, están formadas por una lámina silicea y otra aluminica.

Las montmorilonitas, de composición $[10H_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O]$, están formadas por una lámina aluminica entre dos siliceas que se superponen.

Las illitas tienen como composición



están estructuradas de manera similar a las montmorilonitas. Sin embargo manifiestan una tendencia a formar grumos, reduciéndose el área expuesta al agua por unidad de volumen de material .

b- Propiedades Físico-Químicas de las arcillas

Originalmente cada partícula de arcilla tiene, en su superficie, cargas negativas de diferente intensidad, de acuerdo a las características del suelo. Lo anterior posibilita la atracción tanto de los cationes H^+ del agua, como de los cationes de diferentes elementos químicos. Por tanto cada partícula de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua, las cuales están ligadas a su estructura y forman una envoltura denominada agua adsorbida.

A pesar de esta capa la partícula siempre queda en posibilidad de actuar como foco de atracción para otros cationes. Esto es debido a que las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas. Al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) atrae otros cationes y actúa como un dipolo permanente.

Además de los aspectos mencionados, los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes adsorvidos en su película superficial, mediante la propiedad conocida como intercambio catiónico. Como un ejemplo de este fenómeno tenemos el caso de una arcilla hidrógena (con cationes H^+), la cual puede transformarse en arcilla sódica, si se circula a través de su masa una solución acuosa de sales de sodio. Los cationes más usualmente intercambiables son Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ y $(NH_4)^+$.

La capacidad de intercambio, en general, es apreciable en-

ra condiciones de acidez del suelo, o sea para valores de pH menores de 7. Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorilonitas. Las illitas ocupan una posición intermedia. A. P. Black y S. A. Hannah (Ref. #19) en una investigación efectuada emplean arcillas caolinitas y montmorilonitas, cuyas capacidades de intercambio se presentan a continuación a manera de ilustración:

Arcilla	Capacidad de Intercambio me/100 g.
Caolinita	8.7
Montmorilonita	115.0

Por otro lado, la capacidad de intercambio también aumenta con la velocidad y concentración de la solución que circula por la masa de suelo.

c) Estabilidad de los coloides

Las partículas de arcilla chocan frecuentemente debido a su movimiento Browniano. Después de la colisión se separan aún más. Si se agrega una pequeña cantidad de sales a la dispersión de arcillas, las partículas empiezan a aglomerarse después de cada colisión y crecen en la suspensión, produciéndose el efecto contrario. En realidad todas las dispersiones, en un sentido estricto, son inestables debido a que el área interfacial tiende a disminuir. En la práctica a una dispersión coloidal se le denomina como estable si su velocidad de agregación de partículas es muy lenta.

Esta agregación tiene lugar por las fuerzas atractivas de van der Waals que operan entre los átomos de las distintas partículas.

Cuando una suspensión conteniendo sales es observada a

simple vista, la aglomeración aparece como un floc que sedimenta rápidamente. Este fenómeno es llamado coagulación o floculación y la suspensión es denominada coagulada, floculada o coloidalmente inestable.

Después de la remoción de las sales y agitando la suspensión es posible, usualmente, restaurar la dispersión original de las partículas individuales. Esta restauración de la solución es llamada defloculación, peptización o reestabilización.

De la observación al ultramicroscopio, se deduce que el fenómeno de la aglomeración de las partículas después de la colisión es debido a la existencia de las fuerzas atractivas entre las partículas, las cuales como se mencionó son denominadas de vander Waals y actúan entre todos los átomos de una partícula y todos los átomos de otra partícula. La fuerza atractiva total entre las partículas es la suma de las fuerzas entre todos los pares

de átomos, dependiendo su magnitud, del tamaño y forma de la partícula y, por extensión, de las características de la dispersión.

En una solución estable y libre de sales, la atracción de partículas es prácticamente la misma que en una solución floculada con sales. Sin embargo, en una solución estable, la atracción de partículas es sucesivamente contrarrestada por la fuerza repulsiva entre las partículas. La repulsión pierde efectividad cuando se incrementa la concentración de iones. De este modo, en la presencia de sales, las fuerzas repulsivas no son capaces de contrarrestar las fuerzas de vander Waals y la solución flocula.

d) El mecanismo de la defloculación de suspensiones de arcilla

Se ha sugerido que el efecto de la neutralización o deflocula-

ción está gobernado por el intercambio iónico. Es decir, es posible estabilizar una suspensión de arcilla invirtiendo la carga superficial positiva de la partícula, producido de cationes adsorvidos, en carga negativa.

Hay razones para asumir que los agentes defloculantes conocidos para las suspensiones de arcilla, invierten la carga de la doble capa. Los aniones de los agentes peptizantes son adsorvidos por las arcillas invirtiéndose su carga.

Pequeñas cantidades de defloculantes bastan para eliminar los rígidos enlaces de unión en soluciones floculadas. Debido a esto, para crear una carga negativa en la superficie de la partícula, la cual no se limite sólo a neutralizar la carga original sino también a provocar la repulsión entre las partículas y su estabilidad en la suspensión, los aniones deben ser adsorvidos en exceso. La razón de esto es que los tipos conocidos de aniones peptizantes tienen una

reactividad específica con el aluminio, con el cual ellos forman complejos aniónicos o sales insolubles. De aquí que estos aniones sean químicamente adsorvidos por reacción con el alumbre expuesto.

Cuando la adsorción química conduce a la formación de aniones complejos, como es el caso de los polimetáfosfatos, la creación de la carga negativa es fácilmente entendida.

Cuando una sal de aluminio neutral e insoluble es el producto de la reacción, los aniones adicionales serán adsorvidos preferentemente sobre la sal de aluminio, adherida a la superficie, y podrán actuar como iones determinantes para modificar la carga superficial. Alternativamente la distribución espacial de los sitios de carga positiva en las superficies es tal que, dos o más valencias de los aniones pesquizantes no pueden ser satisfechas simultáneamente.

Sin embargo una valencia puede ser neutralizada por la adhección del anión al sitio de carga positiva, al tanto

que otros grupos negativos del anión pueden constituir cargas negativas.

El agente defloculante más adecuado para un tipo dado de arcilla depende de varios factores. En la práctica, es difícil predecir cual producto químico será el más eficiente peptizador, pero éste podrá ser seleccionado a través de una serie de ensayos o pruebas previas.

En general, algunas sales que contienen aniones capaces de reaccionar o formar complejos con el aluminio y otros cationes de las arcillas, podrán mejorar la estabilidad de las suspensiones.

6.4.3. Pruebas preliminares - Selección de la arcilla

a. Introducción

El objetivo de esta etapa preliminar es estudiar el comportamiento de diversos tipos de arcilla en suspensión tanto en agua de la llave como en agua destilada, comprobando en todos los casos, la estabilidad de la suspensión. Las pruebas efectuadas en agua destilada, sirven como patrón de comparación para evaluar, principalmente, el efecto e incidencia de las sales en el agua de la llave en la precipitación de las partículas de arcilla.

La arcilla que presente, para las condiciones mencionadas, un mejor comportamiento desde el punto de vista de estabilidad o más bien que precipite más lentamente, se selecciona para las pruebas ulteriores.

b) Metodología experimental y análisis de resultados

De acuerdo principalmente a la disponibilidad de los materiales se prueba con cuatro tipos diferentes de arcillas, tan-

to en lo que se refiere a su dureza como a su composición.

Se utiliza una arcilla caolín grado analítico, bentonita grado industrial, una arcilla del Estado de Michoacán y una arcilla de características montmoriloníticas.

El procedimiento utilizado se describe en el Anexo (Procedimiento I).

Se utiliza primeramente bentonita de grado industrial. Los resultados se graficaron en la Fig. # 7. En agua destilada se obtuvieron resultados satisfactorios. Sin embargo al mezclar la bentonita con agua de la llave, las turbiedades disminuyeron considerablemente, llegando a un valor despreciable después de 28 horas.

Al utilizar caolín, grado analítico o reactivo, tanto en agua destilada como en agua de la llave, las turbiedades del sobrenadante fueron muy superiores a las obtenidas para la bentonita. No obstante lo anterior, el caolín

analítico, al inicio presenta un decremento de turbiedad en el tiempo más pronunciado que la bentonita. Al mismo tiempo a estas alturas de la investigación quedaba la duda del comportamiento de un caolín de grado industrial. Los altos volúmenes de agua a emplear limitaban el empleo de caolín analítico por ser oneroso y difícil de conseguir para las cantidades requeridas.

Dejando la inquietud anterior pendiente, se probó con una arcilla del Estado de Michoacán, México, de composición no determinada. Los resultados mostrados en la misma Fig. # 7, nos indican un comportamiento de la suspensión, tanto en agua destilada, como en agua de la llave bastante estable.

Las turbiedades remanentes del sobrenadante, para el caso del agua de la llave, continúan siendo bastante bajas, pero superiores al caso de la suspensión con bentonita e inferiores a las obtenidas para el caolín analítico.

Seguidamente se utiliza una arcilla con un contenido alto

de montmorillonita. Se debe mencionar que al llegar la investigación a este nivel, se esperaban resultados satisfactorios para esta arcilla, dada su composición de montmorillonita.

De acuerdo a artículo de A. P. Black y Sidney A. Hannah (Ref. # 19), se indica la alta capacidad de intercambio iónico de la Montmorillonita, en relación a la tierra de Fuller y al Caolín. Con este antecedente, se decide profundizar el análisis para esta arcilla. Se prueba, además de la concentración usual de 1 gr. de arcilla en un litro de agua de la llave, con otras concentraciones, a saber 0.5, 2, 3, 4 y 6 gr./litro respectivamente. Los resultados correspondientes se presentan en la Fig. # 8. De acuerdo a la figura anterior, vemos que las suspensiones son sumamente inestables, obteniéndose turbiedades remanentes después de 18 horas de decantación muy bajas. Se aprecia también que a mayor concentración de arcilla en agua, hay una mayor turbiedad y al mismo tiempo también

umenta la tasa de decaimiento de la turbiedad del sobrenadante en el período considerado. Las turbiedades remanentes a las 18 horas, para las diferentes concentraciones, resultan no ser tan diferentes entre sí, como al tiempo "0" y en ningún caso la turbiedad final del sobrenadante sobrepasa los 10 NTU.

FIGURA N° 7

PRUEBAS PRELIMINARES - PREPARACION AGUA SINTETICA

- CURVAS (1) Caolín analítico con agua de la llave.
 (2) Caolín analítico con agua destilada.
 (3) Bentonita industrial con agua de la llave.
 (4) Bentonita industrial con agua destilada.
 (5) Arcilla de Michoacán con agua de la llave.
 (6) Arcilla de Michoacán con agua destilada.

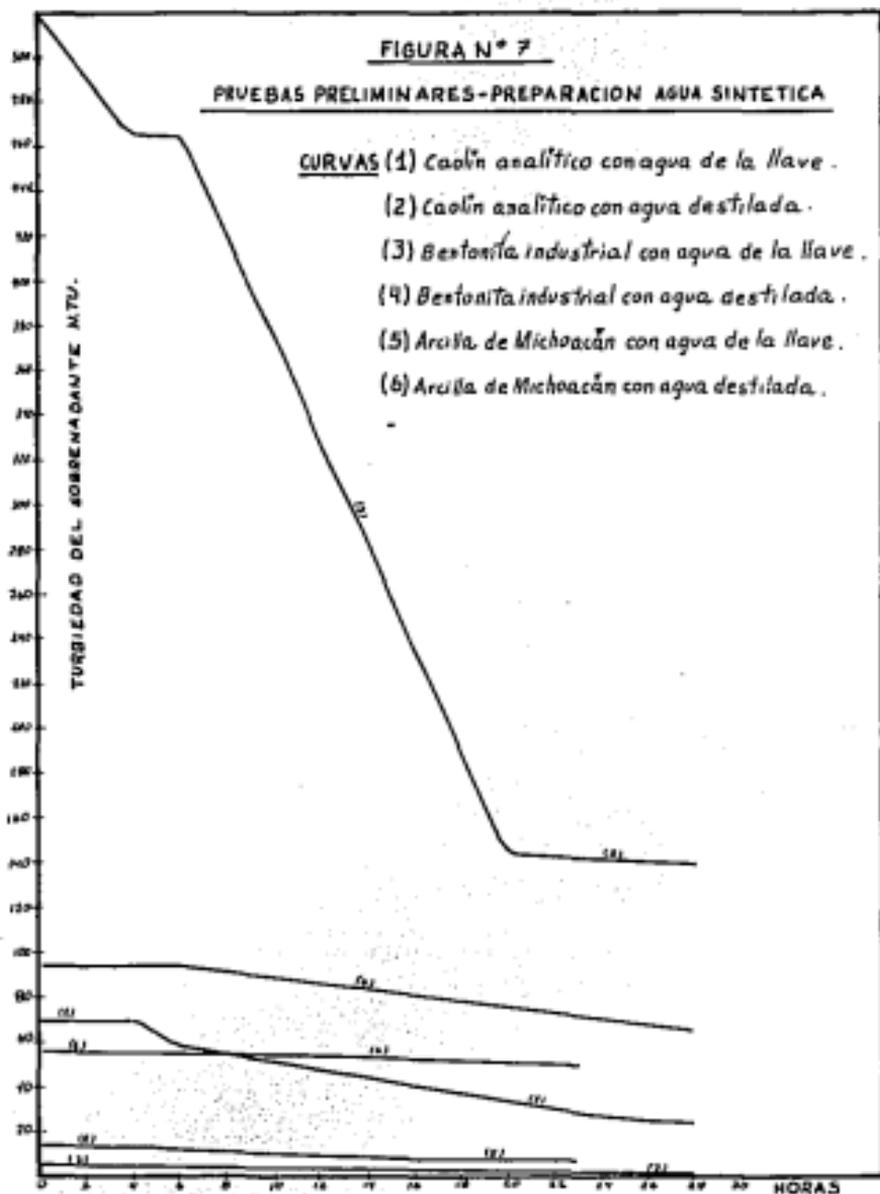
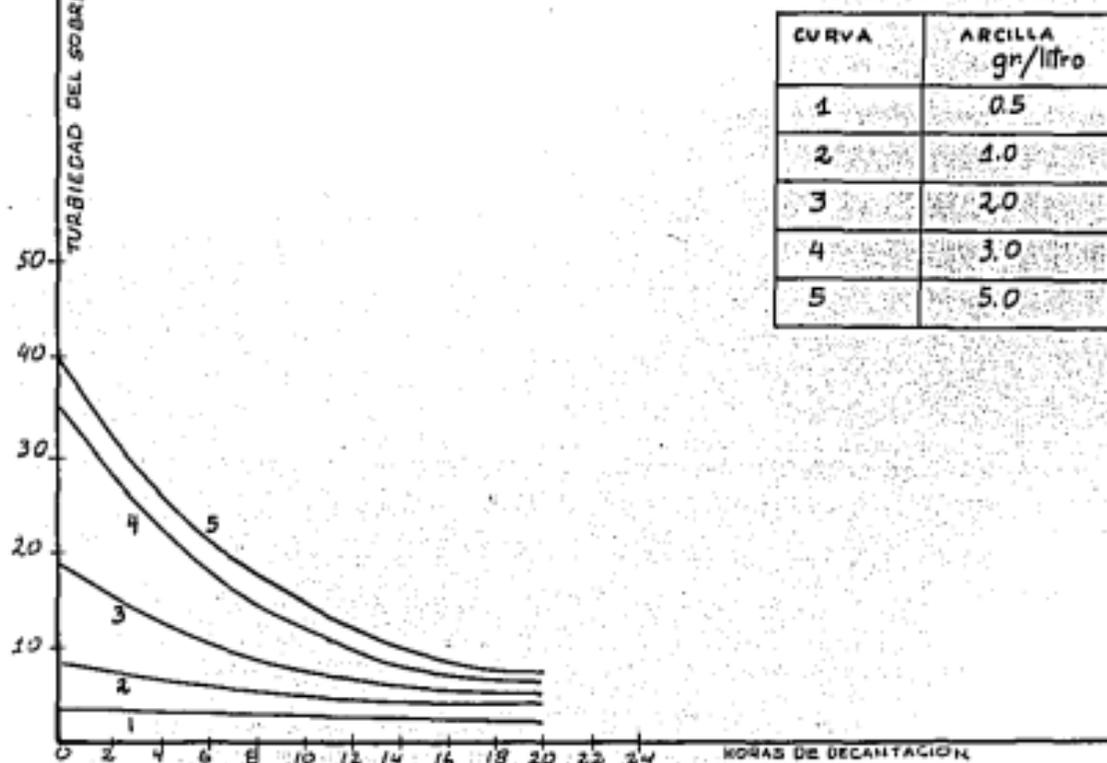


FIGURA N° 9

PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA PREPARACION DEL AGUA SINTETICA

(2) Arcilla natural con alto contenido de montmorillonita, en agua de la llave.



A estas alturas del trabajo se decide introducir algunas modificaciones al procedimiento inicialmente descrito para la preparación de la suspensión de arcilla en agua. Como referencia únicamente, se decide seguir emulcando la misma arcilla natural con montmorillonita.

Las modificaciones introducidas se refieren a :

- dejar previamente saturando la arcilla en agua de la llave durante 6 días;
- tomar la cantidad de arcilla deseada, cuyo peso corresponde no ya al peso seco del material, sino al peso húmedo de la arcilla saturada en agua, y de esta manera preparar las suspensiones en agua de la llave a las concentraciones deseadas;
- se modifica la velocidad de agitación. En lugar de agitar a 90 r.p.m. , se agita en un equipo especial (Licuadora) , a altas velocidades de rotación durante el mismo período.

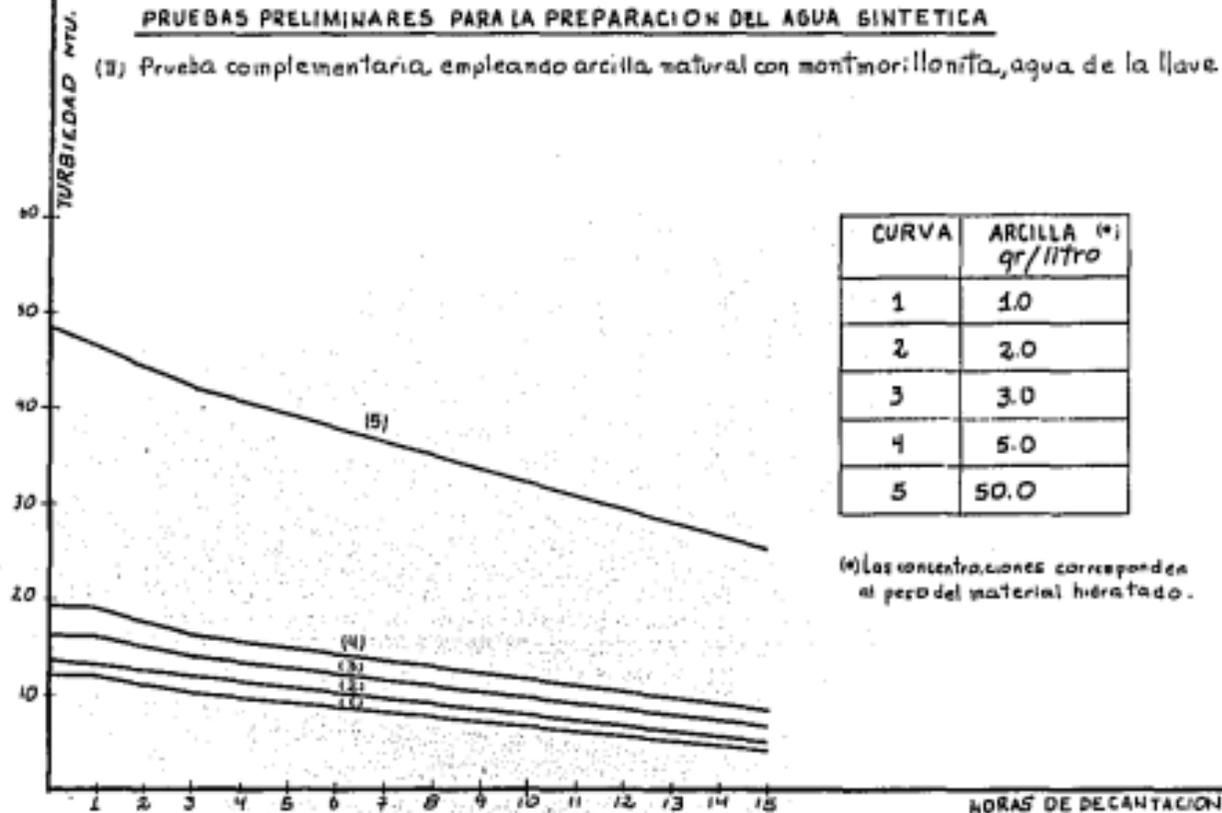
Después de dejar decantar durante el período pre-establecido y muestrear el sobrenadante a diferentes intervalos de tiempo, los resultados para diferentes concentraciones de arcilla, se presentan en la Fig. # 9 . Como se puede observar los resultados no son satisfactorios. Las suspensiones son sumamente inestables y aún cuando las curvas no pueden ser comparadas con las obtenidas por el procedimiento original, dado que se refieren a un peso hidratado del material, el cual es diferente del peso seco considerado en un inicio, sí es posible evaluar la estabilidad de la suspensión en el tiempo. A las 15 horas de iniciadas las determinaciones de turbiedad del sobrenadante, se decide suspender la prueba debido a que, para las concentraciones de 5 gr / litro o menores, las turbiedades residuales eran ya inferiores a 10 NTU.

Como referencia , se presenta la curva # 5 obtenida na-

FIGURA N° 9

PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA PREPARACION DEL AGUA SINTETICA

(3) Prueba complementaria, empleando arcilla natural con montmorillonita, agua de la llave.



ra una alta concentración de 50 grs. de arcilla/litro (peso húmedo). Ni aún al inicio de la prueba para esta alta concentración de la suspensión se consigue una turbiedad apreciable (menor a 50 NTU) . Después de las 15 horas, dicho valor se reduce a 25 NTU. Para esta muestra únicamente se midió a las 64 horas la turbiedad del sobrenadante, dando un valor sumamente bajo de 12 NTU (no aparece indicado en la curva correspondiente).

Con la idea de profundizar la investigación en esta etapa preliminar, se decide, utilizando el caolín analítico, efectuar un pretratamiento del material para lograr un mejor fraccionamiento y remoción de impurezas del mismo, facilitando así la formación del coloide.

Dicho procedimiento (G. Méndez, Ref. #1) se detalla en el Anexo (Procedimiento II).

Después de efectuar el procedimiento descrito en el Anexo para una muestra de caolín analítico, se obtuvieron los resultados graficados en la Fig. # 10.

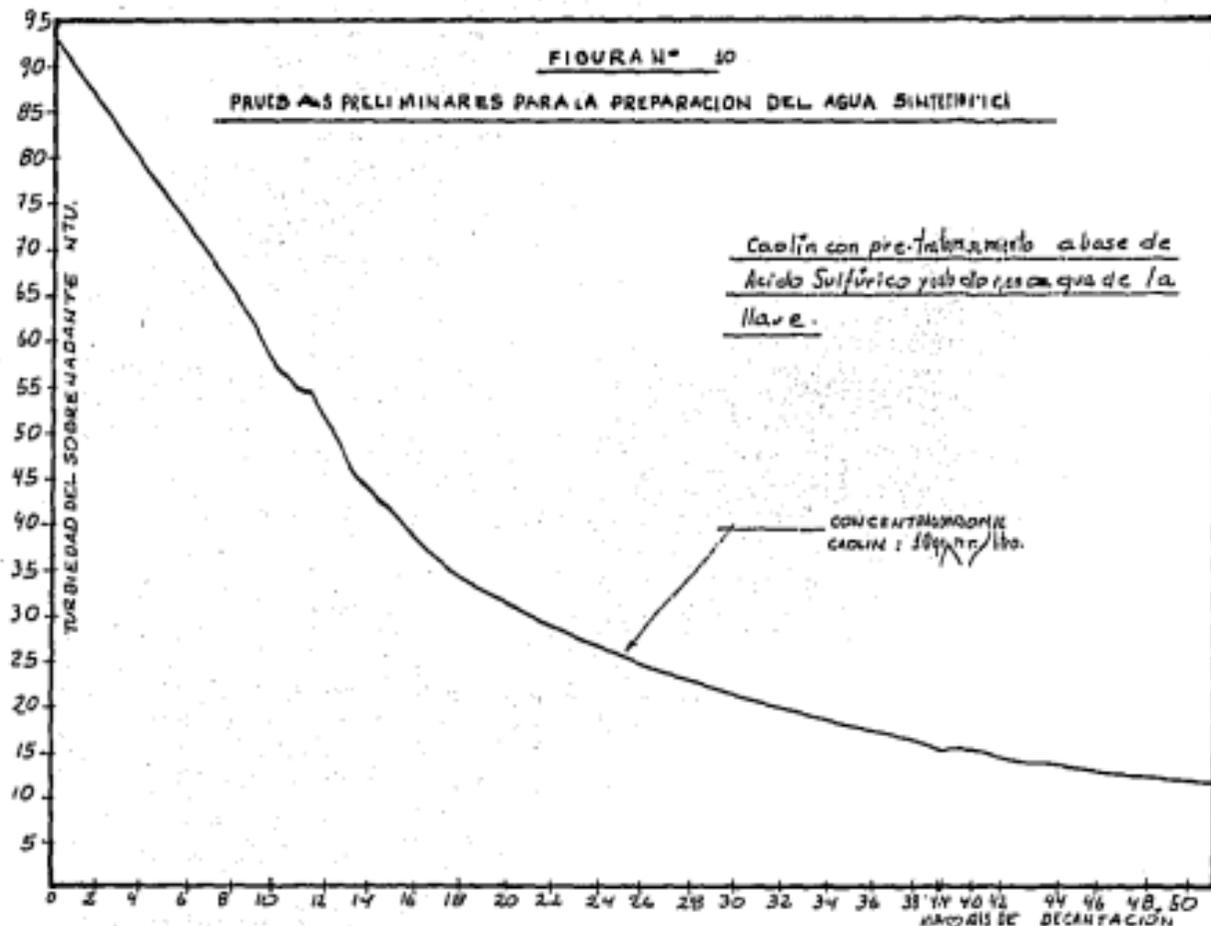
Aún cuando se obtuvo una mejoría con respecto a la prueba anteriormente efectuada para el caolín sin uretratamiento, (Fig. # 7) y haberse obtenido a las 52 horas una suspensión bastante estable, la turbiedad del sobrenadante es baja. Por otro lado el procedimiento, es largo y tedioso para ser aplicado a las cantidades de material necesario para preparar los grandes volúmenes de agua sintética necesarios para el filtrado.

En base a los resultados obtenidos se selecciona el caolín, no solo por su comportamiento sino también por las facilidades para su adquisición, dado que se produce a escala industrial.

6.4.4. Pruebas finales para la preparación del agua sintética

FIGURA N° 10

PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA PREPARACION DEL AGUA SINTETICA



a) Introducción

En la tecnología de las arcillas, para aplicación en la industria química, así como en pruebas de la Mecánica de Suelos, se conocen una gran variedad de químicos capaces de licuar suspensiones de arcillas, con un alto grado de floculación. Estos compuestos químicos incluyen sales inorgánicas, álcalis y compuestos orgánicos y son denominados comúnmente peptizadores ó defloculantes.

De acuerdo con H. van Olphen ("An Introduction to Clay Colloid Chemistry", Ref. # 20), el efecto de la peptización está gobernado por el intercambio iónico. Como ya se mencionó, es posible estabilizar una suspensión de arcilla invirtiendo la carga superficial positiva de la partícula y transformándola en carga negativa. Los aniones de los agentes peptizantes son adsorvidos por las arcillas invirtiéndose su carga. Pequeñas cantidades de defloculantes eliminan los enlaces de unión existentes entre coloides en las soluciones floculadas. Con esto se

crea una carga negativa en la superficie de la partícula, la cual, además de neutralizar la carga positiva original, provoca la repulsión entre los mismos, consiguiéndose la estabilidad en la suspensión.

Como agentes defloculantes se emplean álcalis tales como NaOH y NaCl. También en pruebas de Mecánica de Suelos se utiliza el Hexametáfosfato de Sodio.

No todos los defloculantes surten los mismos efectos. Depende del tipo de arcilla de que se trate. En general gran parte de los agentes peptizantes de índole inorgánica, son compuestos de sodio. En la forma ácida la mayoría de las arcillas son menos estables que en la forma de sodio.

De esta manera la conversión de la arcilla de hidrógeno en arcilla de sodio resultará en un incremento de la estabilidad.

En la prueba del hidrómetro empleada en la Mecánica de Suelos para determinar la velocidad de asentamiento de suspensiones de arcilla en agua y granulometría del material, se emplean comúnmente una serie de coqueos. Dentro de ellos tenemos el Silicato de Sodio, Acido Prusiano, Tetrafosfato de Sodio, Trisolfato de Sodio, Meta-Fosfato de Sodio, Pirofosfato de Sodio, Meta-Silicato de Sodio, Peróxido de Hidrógeno, algunos detergentes, Carbonato de Sodio, Hidróxido de Sodio, Poliestireno Sulfonato y Oxalato de Sodio (Lambe T. W. Ref. # 18).

El objetivo central de esta etapa de la investigación es lograr una suspensión coloidal de caolín en agua de la llave, mediante la adición del defloculante que resulte más adecuado.

De acuerdo a la lista anterior y basados en la dispo-

bilidad de productos químicos, se seleccionan los componentes indicados en el Cuadro # 12, para probar su habilidad como defloculantes.

Cuadro # 12

Componentes Sujetos a Experimentación como
Defloculantes

Componento	Nomenclatura Química	Peso Molecular
Hexametáfosfato de Sodio	$(\text{NaPO}_3)_6$	611.80
Cloruro de Sodio	NaCl	58.44
Hidróxido de Sodio	NaOH	
Meta-Silicato de Sodio	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	284.22
Oxalato de Sodio	$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$	134.00
Carbonato de Sodio	Na_2CO_3	105.99
Peróxido de Hidrógeno 30%	H_2O_2	34.01

b) Metodología experimental y análisis de resultados

El procedimiento experimental se efectua mediante la secuencia indicada en el Anexo (Procedimiento III - a)

En los cuadros siguientes se anotán las dosis empleadas en cada defloculante y los resultados obtenidos

Cuadro # 13

Suspensión de Caolín en Agua de la llave con Hexametáfosfato de Sodio como Defloculantes en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo #	Concent. de $(NaPO)$ gr/litro	Observación después de 3 días decanación
1	0.01	Aceptable
2	0.05	Condiciones óptimas
3	0.10	Aceptable
4	0.50	Condiciones óptimas
5	1.00	Aceptable
6	1.50	Condiciones óptimas
7	5.00	Presenta sobrenadante de baja turbiedad
8	10.00	Pres. sobrenadante baja turbiedad

En general, con el $(\text{NaPO}_3)_6$ se observan resultados satisfactorios especialmente en las muestras # 1,2,3,4,5,y 6. Concentraciones demasiado altas producen efecto contrario, es decir una precipitación de la suspensión.

Cuadro # 14

Suspensión de Caolín en Agua de la llave con Cloruro de Sodio
(NaCl) como Defloculante, en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo #	Concent. de NaCl gr/litro	Observación después de 3 días de decantación
1	0.001	Resultados Nulos
2	0.01	Resultados Nulos
3	0.05	Resultados Nulos
4	0.10	Resultados Nulos
5	0.50	Sobrenadante ligeramente turbio
6	1.00	Resultados Nulos
7	1.50	Resultados Nulos
8	5.00	Sobrenadante ligeramente turbio

El NaCl no da resultados aceptables. Para dosis bajas e intermedias parece que dicha sal produce coagulación y precipitación de la concentración.

Algunas dosis altas producen una ligera turbiedad.

En el Cuadro #15 se muestran los efectos de la base NaOH.

Cuadro # 15

Suspensión de Caolín en Agua de la Llave con Hidróxido de Sodio (NaOH) como Defloculante, en Tubos Wersler de 50 ml.

Tubo #	Concentr. de NaOH gr./litro	Observación después de 3 días de decantación
1	0.01	Resultados Nulos
2	0.05	Presenta ligera turbiedad
3	0.10	Presenta ligera turbiedad
4	0.50	Resultados Nulos
5	1.00	Resultados Nulos
6	1.50	Resultados Nulos
7	5.00	Resultados Nulos
8	10.00	Resultados Nulos

El NaOH da resultados muy pobres, aunque un tanto mejores

a los producidos por el NaCl. Las dosis bajas producen alguna turbiedad del sobrenadante. Las dosis intermedias o altas no producen ningún efecto.

En el Cuadro #16 se presentan resultados obtenidos con el Meta-Silicato de Sodio.

Cuadro # 16

Suspensión de Caolín en Agua de la Llave con Meta-Silicato de Sodio como Defloculante en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo #	Concentr. de Meta-Si licato de Sodio gr/lit.	Observación despues de 3 días de Decantación
1	0.01	Resultados Nulos
2	0.05	Resultados Nulos
3	0.10	Presenta ligera turbiedad
4	0.50	Resultados aceptables
5	1.00	Resultados aceptables
6	1.50	Presenta ligera turbiedad
7	5.00	Resultados excelentes
8	10.00	Resultados excelentes

El Meta Silicato de Sodio presenta excelentes resultados como defloculante, principalmente en dosis altas o muy altas. Sin embargo, se considera conveniente, probar con alguna dosis intermedia o baja en las etapas siguientes de la experimentación.

En el Cuadro #17 se muestran los resultados obtenidos de la observación visual del sobrenadante empleando el Oxalato de Sodio

Cuadro # 17

Suspensión de Caolín en Agua de la llave con Oxalato de Sodio como Defloculante, en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo	Concentr. de Oxalato de So dio g /lt.	Observación después de 3 días de Decantación
1	0.01	Resultados Nulos
2	0.05	Resultados Nulos
3	0.10	Resultados Nulos
4	0.50	Resultados Nulos
5	1.00	Resultados Aceptables
6	1.50	Presenta ligera turbiedad
7	5.00	Resultados nulos
8	10.00	Resultados nulos

En General, el Oxalato de Sodio no presenta un comporta-

miento adecuado como defloculante en suspensiones de caolín. Dosis bajas o muy altas no producen ningún efecto. Las dosis de intermedias a altas logran una turbiedad residual más bien baja.

En el Cuadro #18 se muestran los resultados del empleo del Carbonato de Sodio.

Cuadro #18

Suspensión de Caolín en Agua de la Ilave con Carbonato de Sodio como Defloculante en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo	Concentr. de Carbonato de Sodio gr/lt	Observación después de 3 días de Decantación
1	0.01	Resultados Nulos
2	0.05	Resultados Nulos
3	0.10	Resultados Nulos
4	0.50	Presenta ligera turbiedad
5	1.00	Presenta ligera turbiedad
6	1.50	Presenta ligera turbiedad
7	5.00	Resultados nulos
8	10.00	Resultados nulos

El Carbonato de Sodio no ofrece resultados aceptables. Sin embargo se decide seguir utilizándolo en pruebas posteriores.

res dado que para algunas dosis se apreciaba una ligera turbiedad del sobrenadante.

Finalmente en el Cudro # 19, se muestran los efectos del Peroxido de Hidrógeno.

Cudro # 19

Suspensión de Caolín en Agua de la llave con Peroxido de Hidrógeno como Defloculante, en Tubos Nessler de 50 ml.

Tubo	Concentración de Peroxido de Hidrógeno ml/lt.	Observación
1	0.1	Result. Nulos
2	0.5	Result. Nulos
3	1.0	Result. Nulos
4	1.5	Result. Nulos
5	2.0	Result. Nulos
6	2.5	Result. Nulos
7	3.0	Result. Nulos
8	5.0	Result. Nulos

A partir de esta prueba preliminar se descarta el empleo del PerÓxido de Hidrógeno como defloculantes para su empleo en suspensiones de Caolín. No se utiliza para pruebas posteriores.

Como parte del análisis final de esta primera etapa de observación visual de suspensiones con defloculantes se presenta el Cuadro # 20 donde aparecen los componentes con sus dosis seleccionadas para las pruebas siguientes

Cuadro # 20

Dosis Seleccionadas de Pruebas de Observación Visual en Tubos Nessler

Componente	Dosis Seleccionadas para Pruebas Posteriores gr/litro.
Hexametáforato de Sodio	0.05 0.5 1.5
Cloruro de Sodio	0.5 5.0
Hidróxido de Sodio.	0.05 0.10

Continuación Cuadro # 20

Compuesto	Dosis Seleccionadas Para Pruebas Posteriores gr/litro.
Metasilicato de Sodio	0.10 0.50 1.00 5.00 10.00
Oxalato de Sodio	1.00
Carbonato de Sodio	1.00

Como segunda etapa de la investigación se verifica la estabilidad de las suspensiones empleando los defloculantes en las dosis primeramente seleccionadas.

Se pretende cuantificar, mediante mediciones periódicas de la turbiedad del sobrenadante, el efecto de los diferentes defloculantes en las dosis seleccionadas en la etapa anterior y que fueron mostradas en el Cuadro # 20. Se sigue la secuencia mostrada en el Anexo (Procedimiento III-b).

De acuerdo a lo anterior se muestran en los Cuadros #21 y #22 los resultados obtenidos.

Cabo Ciego #21

Resultados Obtenidos de la Determinación
de Turbiedad del Sobrenadante

# de Jarra	Compuesto gr/lit.	Dilución g/lit./gr/lit.	Mediciones de Turbiedad NTU						
			Tiempo de Decantación Acumulado en Horas						
			2	17	21	29	51	74	98h.
1	Sin defloculante	10 U 1.0	65	32	28	24	17	15	8
2	(NaPO ₃) ₂ 0.05	10 U 1.0	75	59	50	41	33	27	25
3	(NaPO ₃) ₂ -1.5	10 U 1.0	67	48	45	40	33	29	27
4	(NaPO ₃) ₂ -1.5	10 U 1.0	68	50	46	40	34	31	30
5	NaCl . 0.5	10 U 1.0	55	28	24	19	17	13	8
6	NaCl . 5.0	10 U 1.0	60	24	20	16	12	9	6
7	NaOH . 0.05	10 U 1.0	69	49	46	40	31	23	20
8	NaOH . 0.10	10 U 1.0	67	48	44	37	34	28	22

Cuadro # 22Resultado Obtenido de la Determinaciónde Turbiedades del Sobrenadante

# de	Compuesto gr/lt.	Caolín gr/lt.	Mediciones de Turbiedad NTU							
			Tiempo de Decantación Acumulado En Horas.							
			0	5	21	29	53	66	77	81
9	Meta Silicato de Sodio 0.1	1.0	89	79	57	50	41	38	--	35
10	Meta Silicato de Sodio 1.0	1.0	90	82	62	55	44	41	--	38
11	Meta Silicato de Sodio 5.0	1.0	92	72	54	47	38	--	33	--
12	Meta Silicato de Sodio 10.0	1.0	95	84	59	53	43	--	39	--
13	Oxalato de Sodio 1.0	1.0	91	82	49	40	28	--	23	--
14	Carbonato de Sodio 1.0	1.0	85	63	32	28	21	--	17	--

En las Figuras de la #11 a la #17 se grafican los resultados obtenidos. En todos los casos, como patrón de referencia se

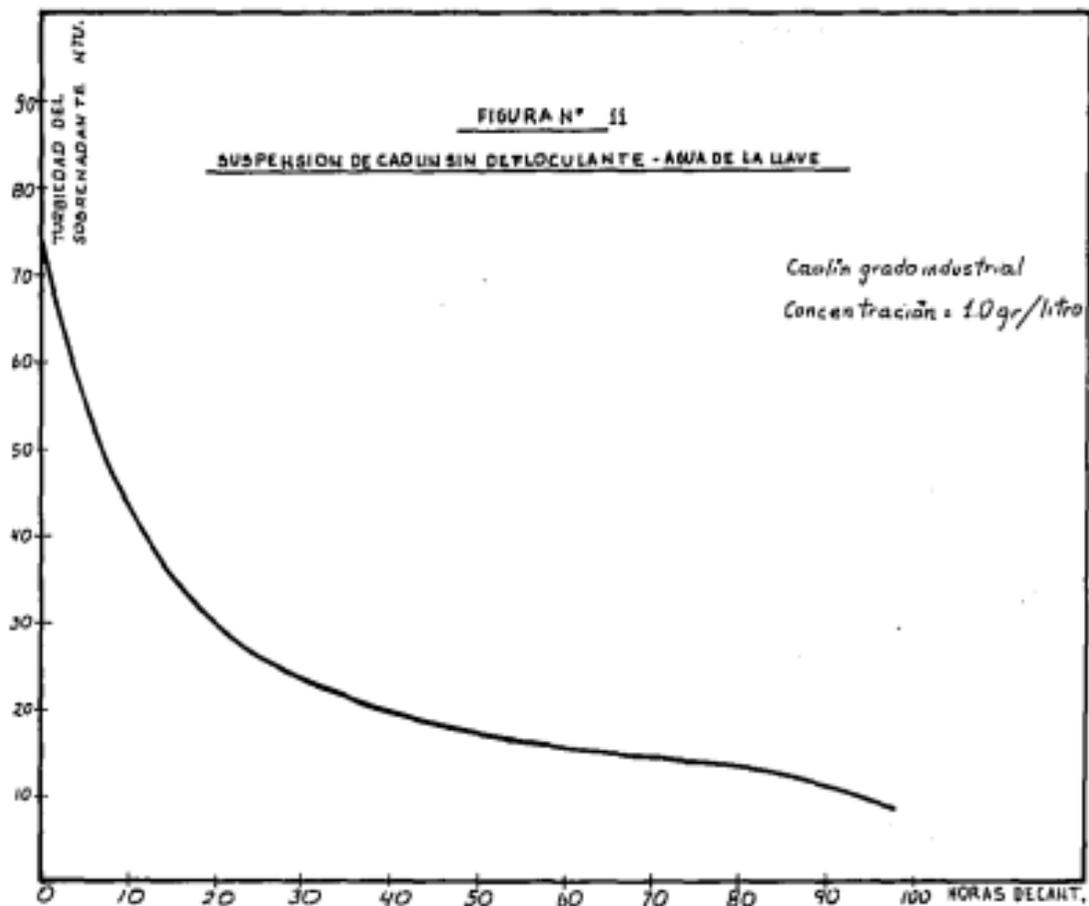


FIGURA N° 12

SUSPENSION DE CAOLIN CON HEXAMETA FOSFATO DE SODIO COMO DEFLOCULANTE (Na_2PO_3)₆

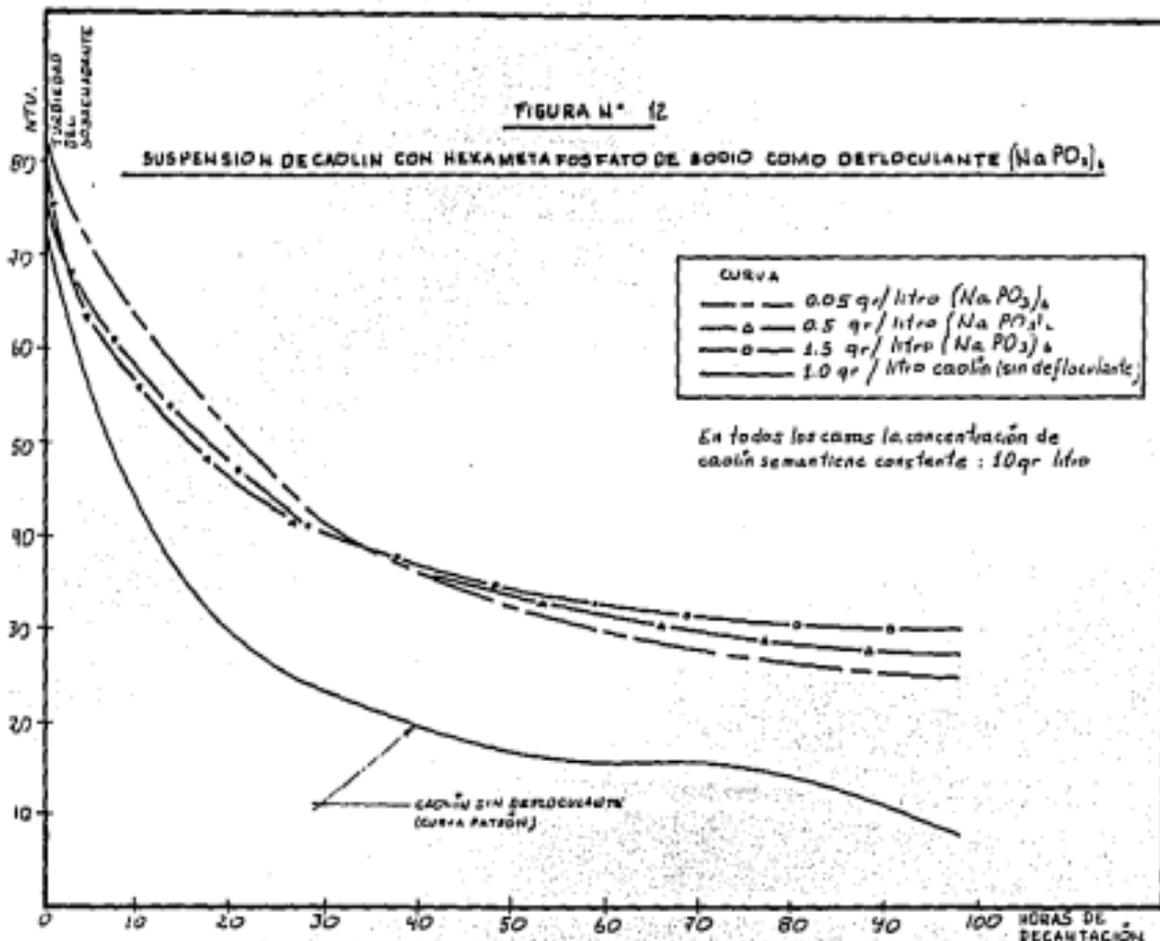


FIGURA N° 13

SUSPENSION DE CAOLIN CON CLORURO DE SODIO (NaCl) COMO DEFLOCULANTE

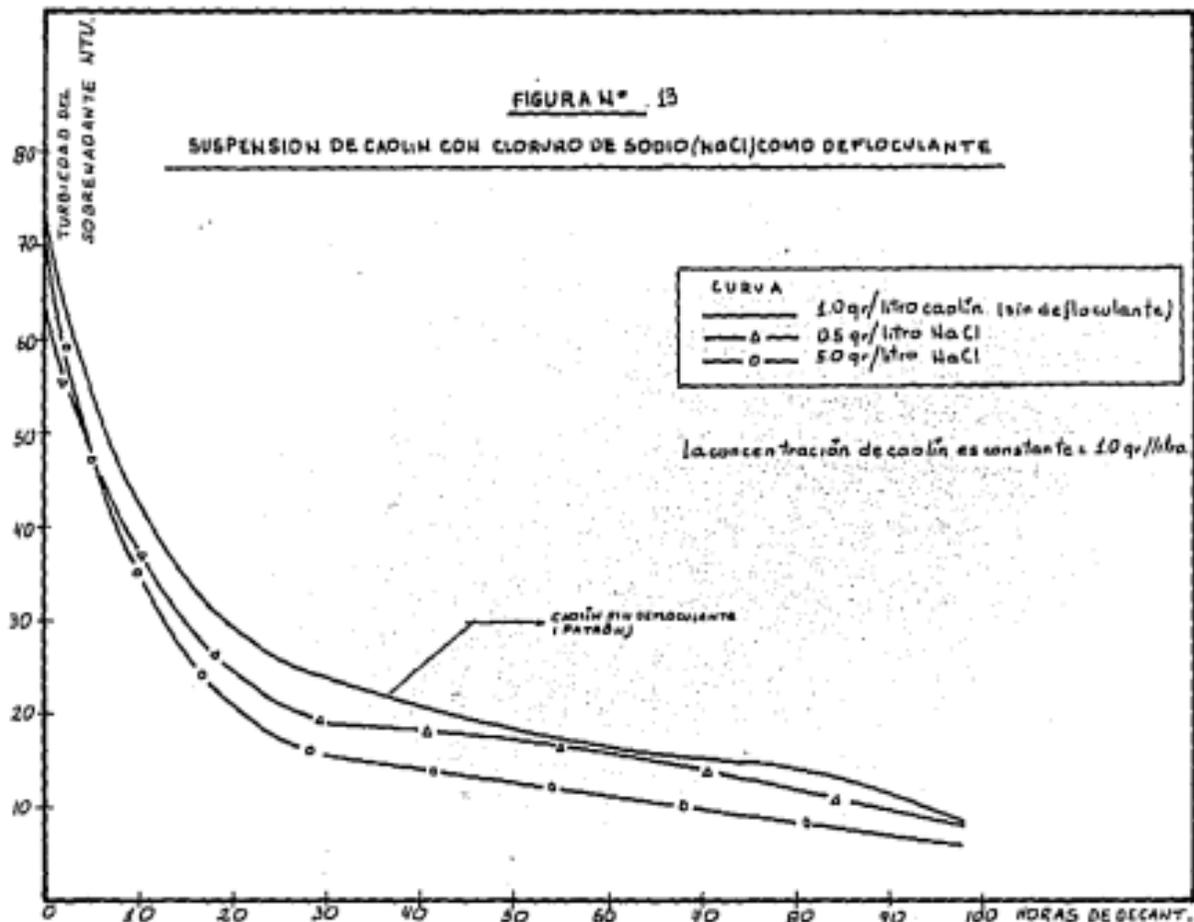


FIGURA N° 19

SUSPENSION DE CAOLIN CON HIDROXIDO DE SODIO COMO DEFLOCULANTE (NaOH)

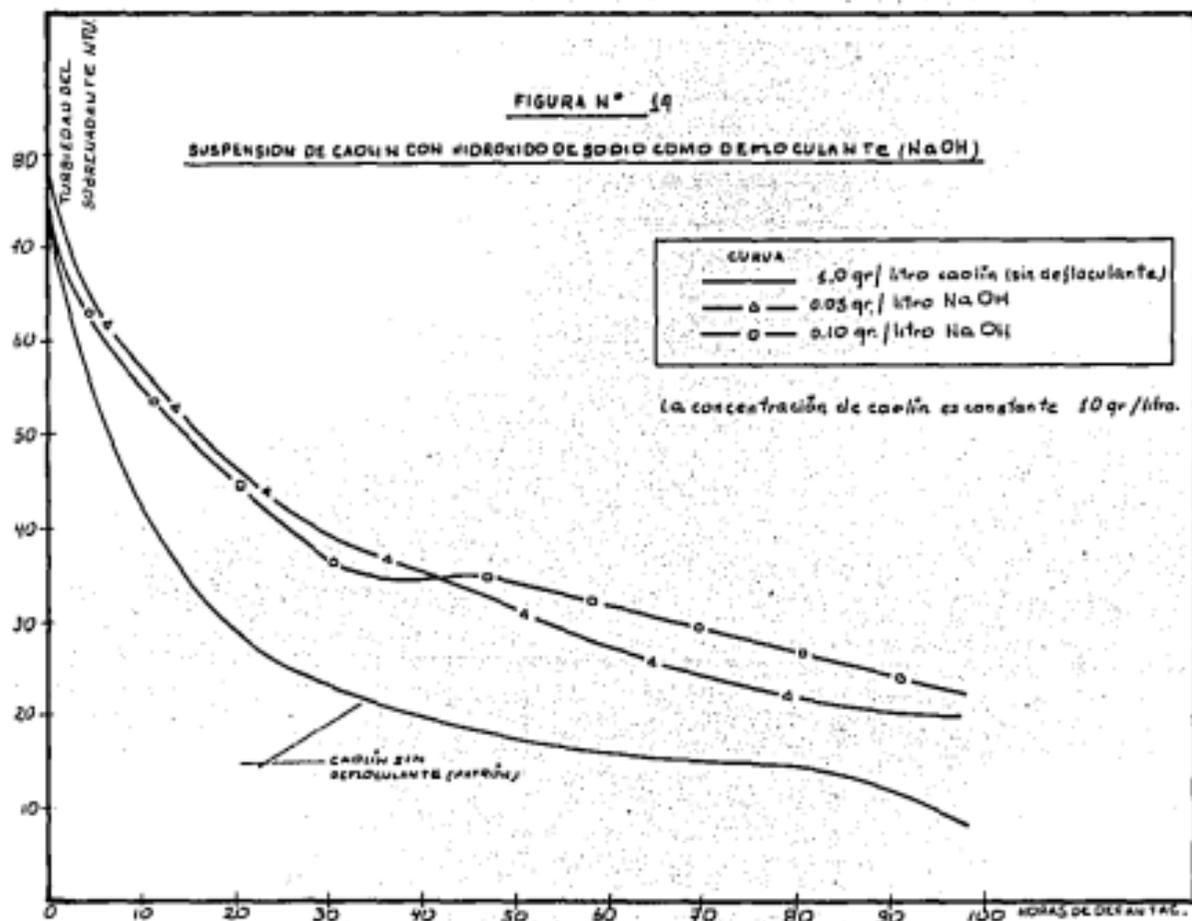


FIGURA N° 15

SUSPENSION DE CAOLIN CON META-SILICATO DE SODIO ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) COMO DEFLOCULANTE

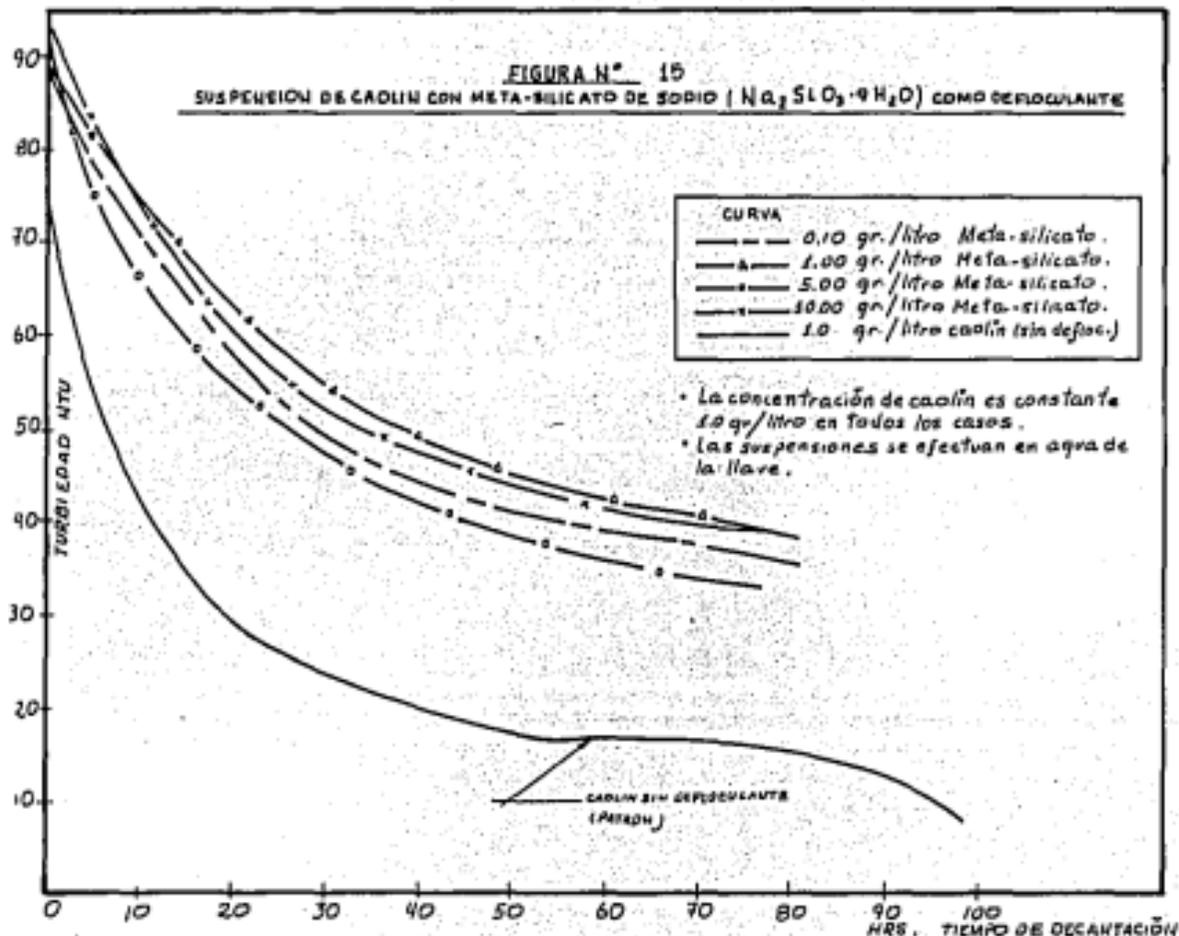
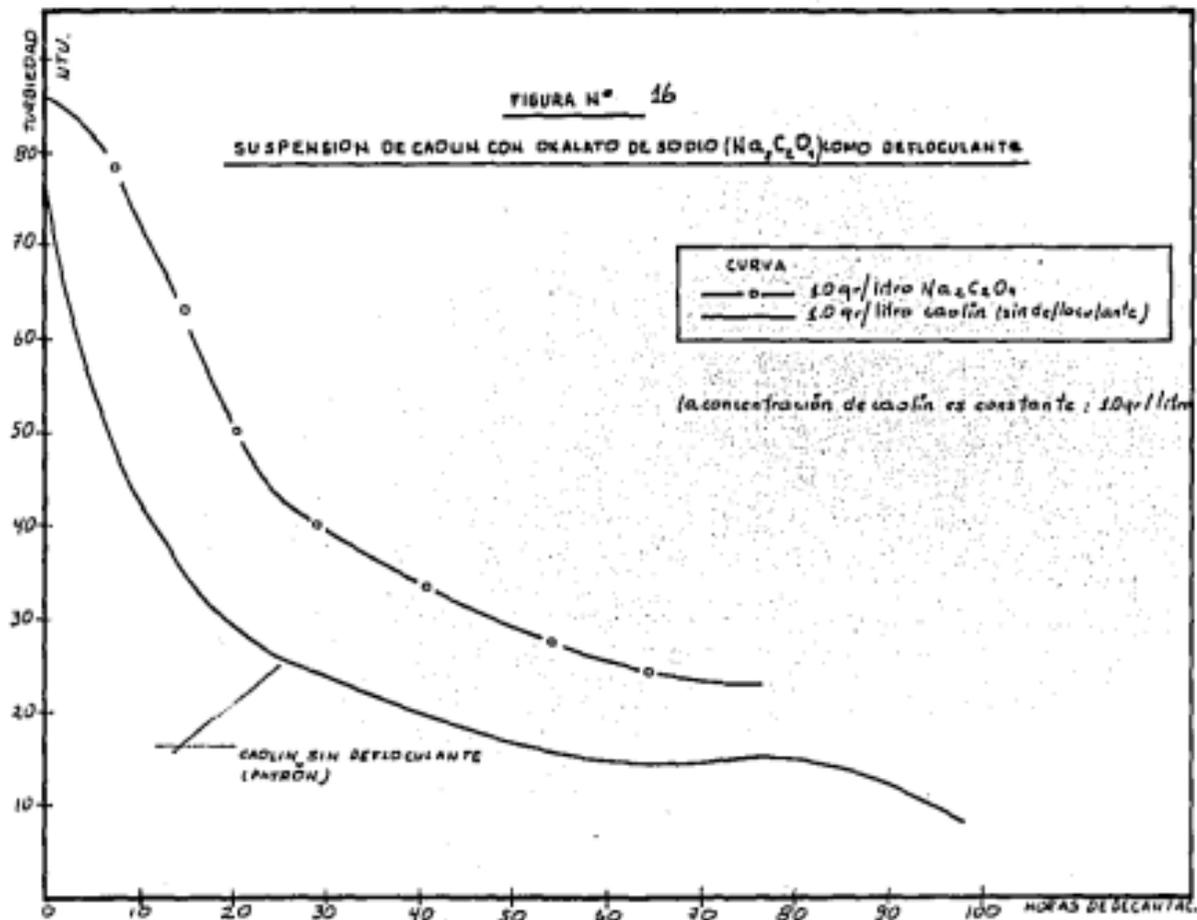


FIGURA N° 16

SUSPENSION DE CAOLIN CON OXALATO DE SODIO ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) COMO DEFLOCULANTE



reproduce la misma curva de una suspensión de caolín en agua de la llave sin defloculante.

De la Fig. # 12, referida al Hexametáfosfato de Sodio se observa que se logra una gran estabilidad. Por otro lado, de acuerdo al trazo general de las curvas, se ve que los resultados son muy similares independientemente de la dosis empleada.

En la Fig. #13 las curvas para el Cloruro de Sodio nos indican que dicho compuesto en lugar de funcionar como defloculante o peptizante, se produce el efecto contrario y se induce la precipitación de la suspensión. El trazo de dichas curvas por debajo de la curva de la suspensión de caolín sin defloculante así nos lo indica.

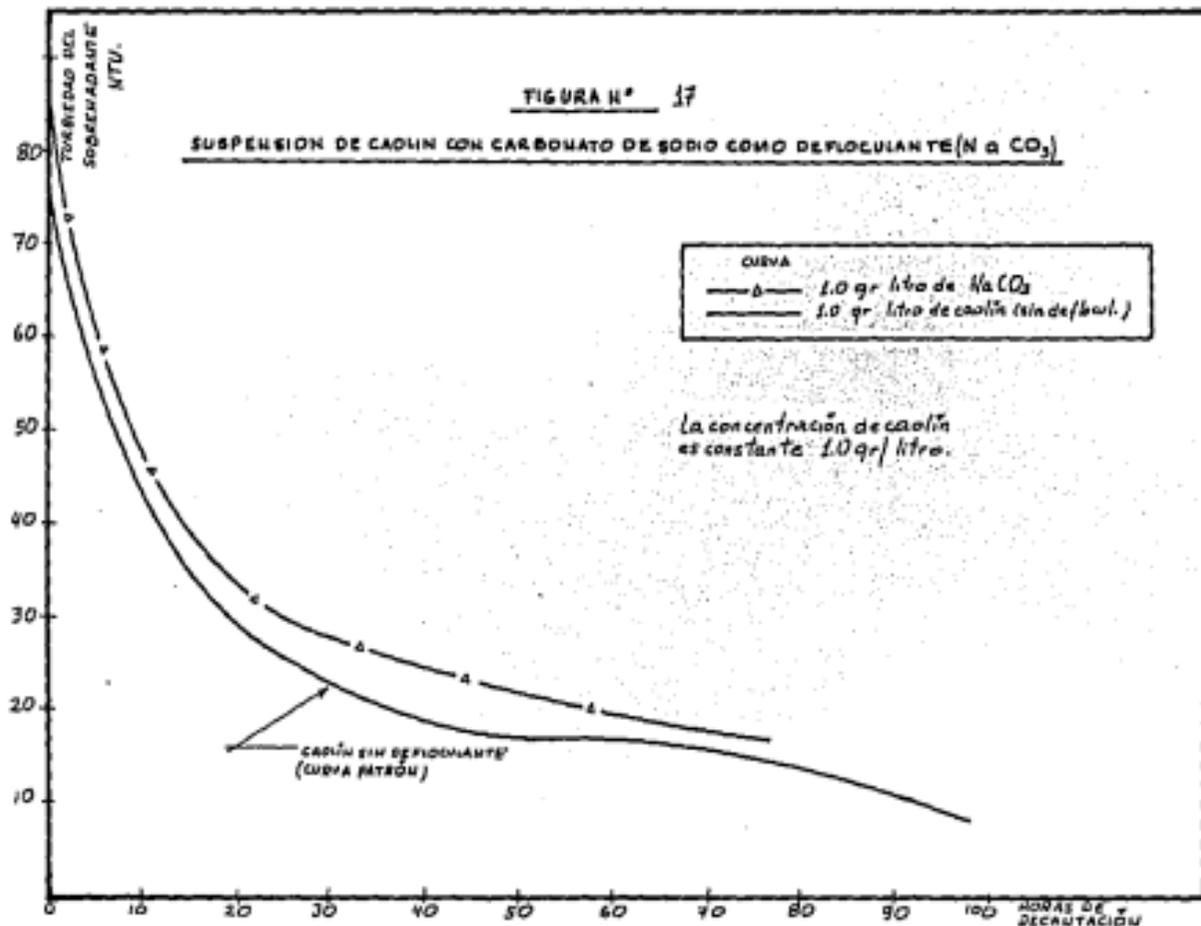
De la Fig. #14 se observa que con el NaOH se logra una cierta estabilidad de la suspensión aún cuando la tendencia general del trazo final de las dos curvas es decreciente.

Las dos dosis seleccionadas dieron resultados similares.

Con respecto al Meta-Silicato de Sodio se observan resultados óptimos en cuanto a la estabilidad se refiere. Los va-

FIGURA N° 17

SUSPENSION DE CAOLIN CON CARBONATO DE SODIO COMO DEFLOCULANTE (Na_2CO_3)



lores de turbiedad del sobrenadante resultan ser comparables e inclusive superiores al Hexametáfosfato de Sodio.

De la Fig. #16, correspondiente al Oxalato de Sodio se ve, de acuerdo a la tendencia general de la curva que se logra una estabilidad relativa.

Finalmente, según se detalla en la Fig. #17 el Carbonato de Sodio tiene un pobre efecto, casi nulo, como defloculante.

De acuerdo a los resultados y consideraciones anteriores y rechazados el NaCO_3 y el NaCl , se obtiene el Cuadro #23 donde se muestran las dosis mínimas de cada compuesto que resultan efectivas para inducir cierto grado de estabilidad a la suspensión

Cuadro # 23

Dosis Mínima Adecuada de Defloculante

Compuesto Defloculante	Dosis Mínima Adecuada gr/lit.
Hexametáfosfato de Sodio	0.05
Hidróxido de Sodio	0.05
Meta Silicato de Sodio	0.1
Oxalato de Sodio	1.0

Ya como una última etapa de la investigación en la preparación del agua sintética, se pretende observar el efecto de la concentración de caolín para una dosis constante de defloculante.

Es decir manteniendo invariable la dosis de defloculante de acuerdo a los valores ya mostrados en el Cuadro #21, se varía la concentración de la arcilla para así apreciar el rango de turbiedades susceptibles de lograr y su estabilidad a través del tiempo.

El procedimiento de preparación de las suspensiones en los vasos de precipitados sigue, básicamente, la misma técnica presentada en la etapa anterior. (Ver Anexo, Proced. III-b).

En los Cuadros # 24 y # 25, se presentan tanto los componentes y concentraciones empleadas así como los resultados obtenidos en cada caso.

Cuadro # 24Resultados Obtenidos Concentración Variable de Arcilla

#	Defloculante conc. gr/litro	Caolín gr/lt.	Mediciones de Turbiedad NTU					
			Tiempo de Decantación Horas					
de			0	13	40	48	72	111
3g								
rra								
1	Hexametáfosfato de Sodio 0.05	0.5	36	28	22	20	17	15
2	Hexametáfosfato de Sodio 0.05	2.0	170	100	48	40	27	25
3	Hexametáfosfato de Sodio 0.05	5.0	275	110	64	54	45	40
4	Hexametáfosfato de Sodio 0.05	10.0	420	120	66	56	48	43
5	Hexametáfosfato de Sodio 0.05	20.0	400	130	76	65	54	50
6	Hidróxido de Sodio 0.05	0.5	35	21	12	9	7	5
7	Hidróxido de Sodio 0.05	2.0	65	23	11	10	8	7
8	Hidróxido de Sodio 0.05	5.0	68	26	14	13	10	8
9	Hidróxido de Sodio 0.05	10.0	84	30	15	12	8	5
10	Hidróxido de Sodio 0.05	20.0	86	18	7	6	4	3

Cuadro # 25Resultados Obtenidos Concentración Variable de Arcilla

# de Jarra.	Defloculante gr/litro	Caolín gr/lt.	Mediciones de Turbiedad. Tiempo Decantación. En horas			
			0	21	67	93
11	Meta Silicato de Sodio 0.1	0.5	53	29	19	17
12	Meta Silicato de Sodio 0.1	2.0	130	90	78	70
13	Meta Silicato de Sodio 0.1	5.0	200	105	97	92
14	Meta Silicato de Sodio 0.1	10.0	150	45	22	20
15	Meta Silicato de Sodio 0.1	20.0	110	25	18	15
16	Oxalato de Sodio 1.0	0.5	60	40	33	21
17	Oxalato de Sodio 1.0	2.0	140	70	58	27
18	Oxalato de Sodio 1.0	5.0	260	72	59	25
19	Oxalato de Sodio 1.0	10.0	130	73	60	25
20	Oxalato de Sodio 1.0	20.0	300	77	52	22

En las Figuras #18, #19, #20 y #21 se grafican los resultados obtenidos para cada uno de los compuestos empleados.

De acuerdo a los cuadros y figuras mencionados es notorio que después de cierto valor alto de concentración de arcillas en la suspensión, las turbiedades residuales no necesariamente aumentan, sino todo lo contrario, decrecen a valores sumamente bajos. Es decir, una saturación de partículas en la suspensión provoca, a pesar del defloculante, una precipitación acelerada al promoverse y aumentarse la probabilidad de choque de las partículas y formación del floc.

El Meta-Silicato de Sodio y el Hexametáfosfato de Sodio, resultan ser los compuestos más adecuados para ser empleados como defloculantes.

FIGURA N° 18

RESULTADO DE PRUEBAS VARIANDO CONCENTRACION DE CADUIN

DOSIS CONSTANTE DE HEXAMETAPOSFATO DE SODIO

[0.005 gr / litro]

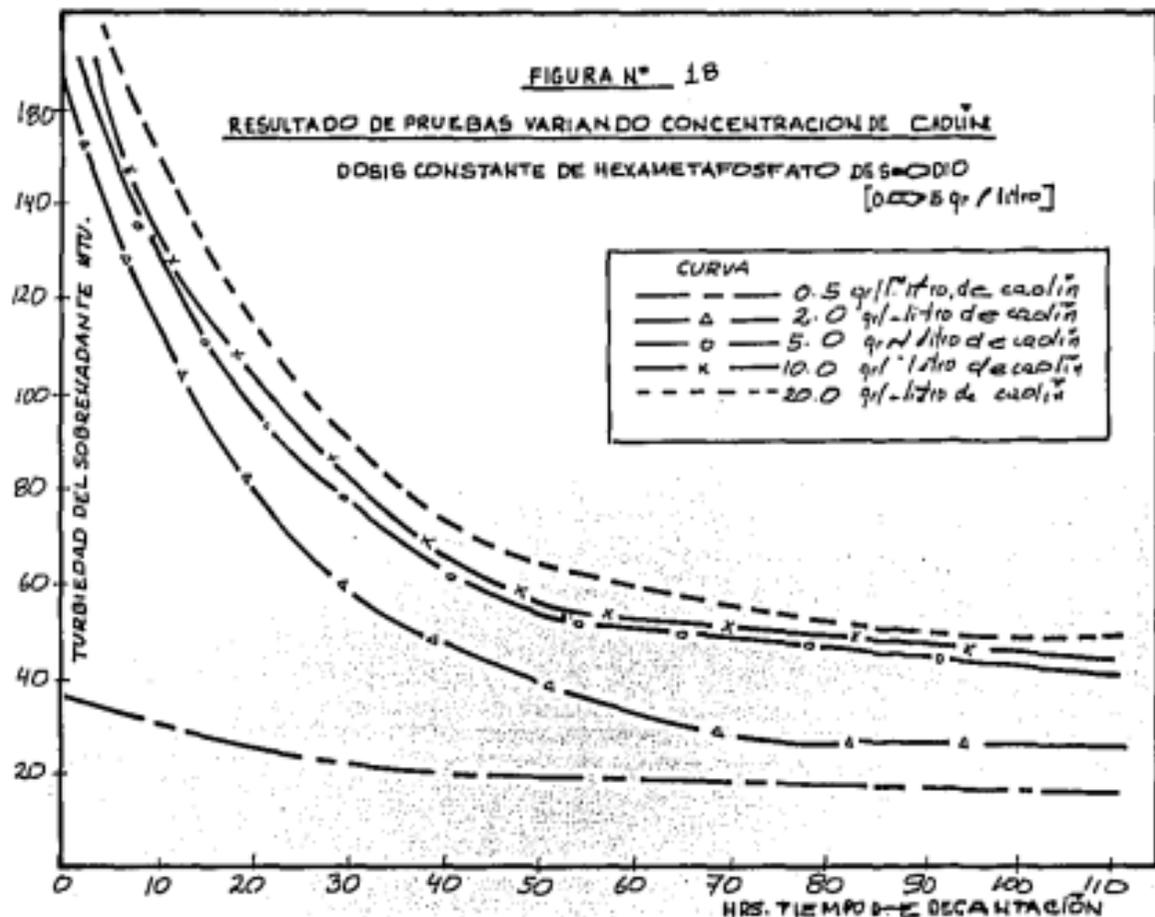


FIGURA N° 19

RESULTADOS DE PRUEBAS VARIANDO CONCENTRACION DE CAOLIN

DOSIS CONSTANTE DE HIDROXIDO DE SODIO

[0.05 gr/litro]

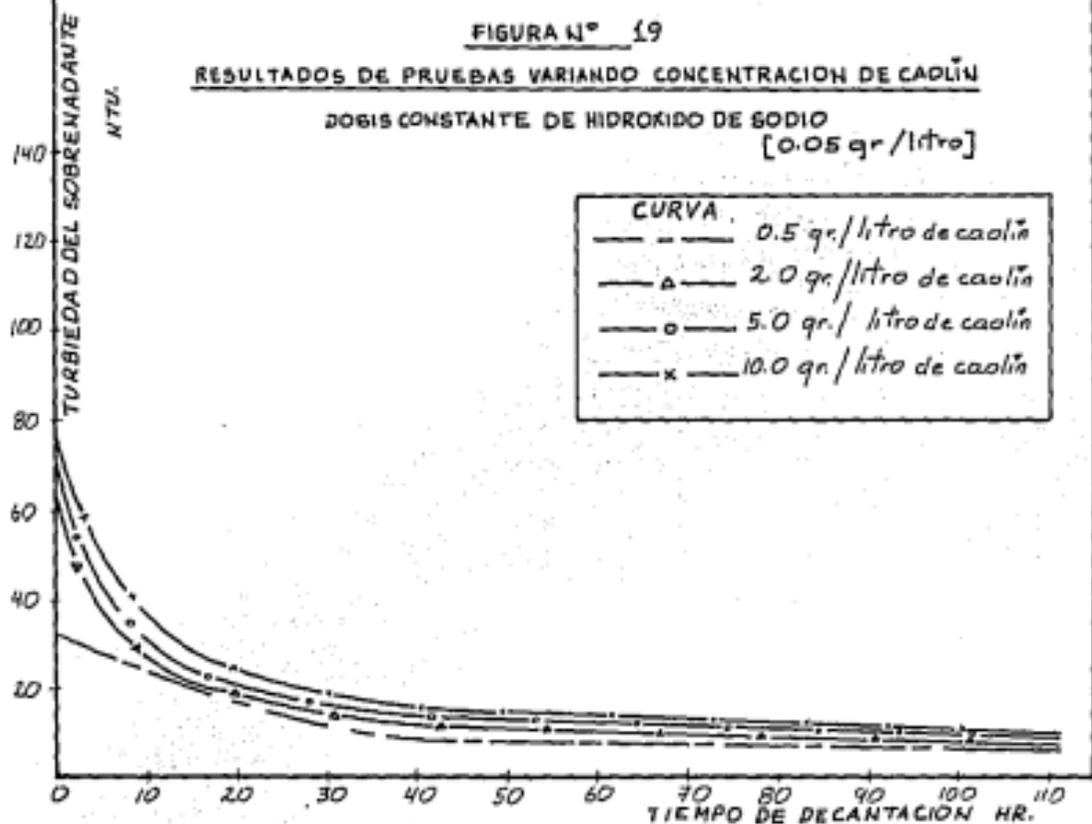


FIGURA N° 20

RESULTADOS DE PRUEBAS VARIANDO CONCENTRACIÓN DE CAOLÍN

POSIS CONSTANTE DE META-SILICATO DE SODIO

[0.1 gr/litro]

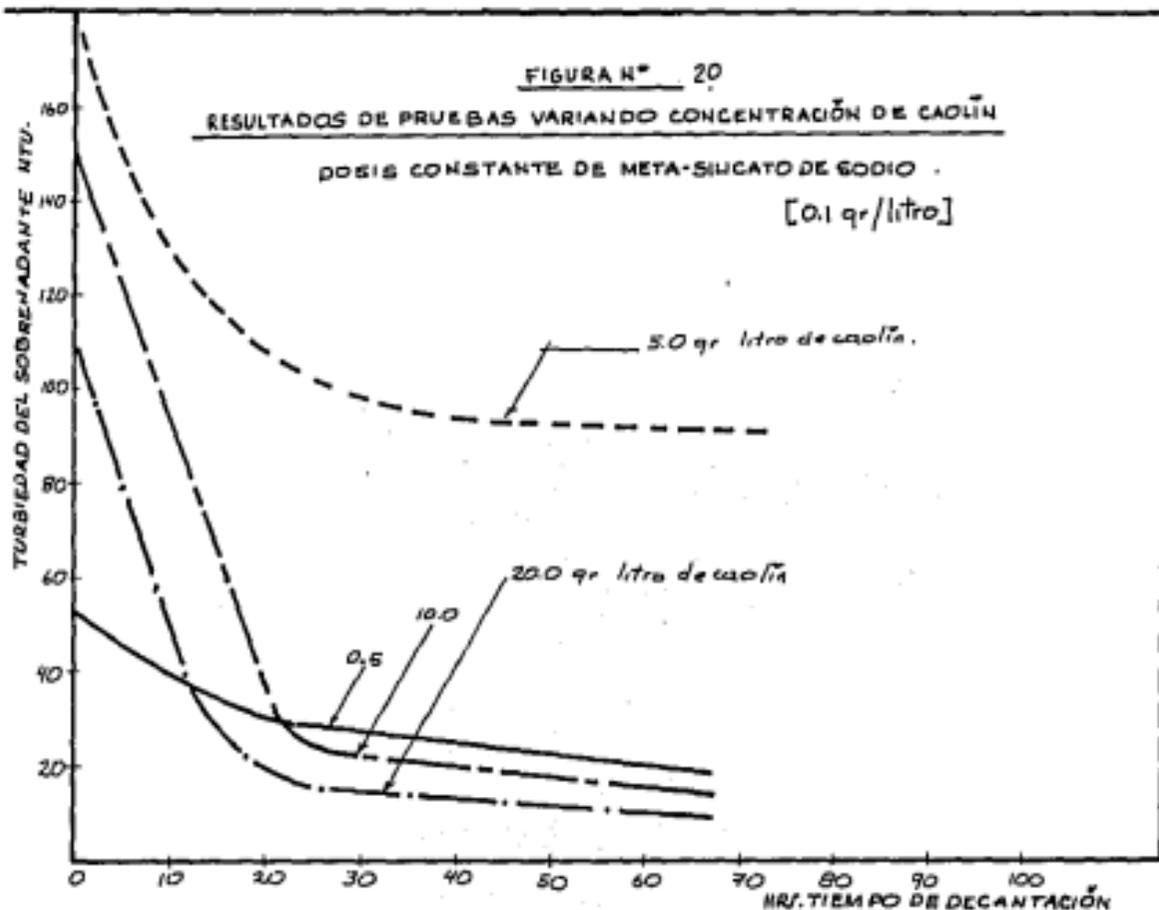
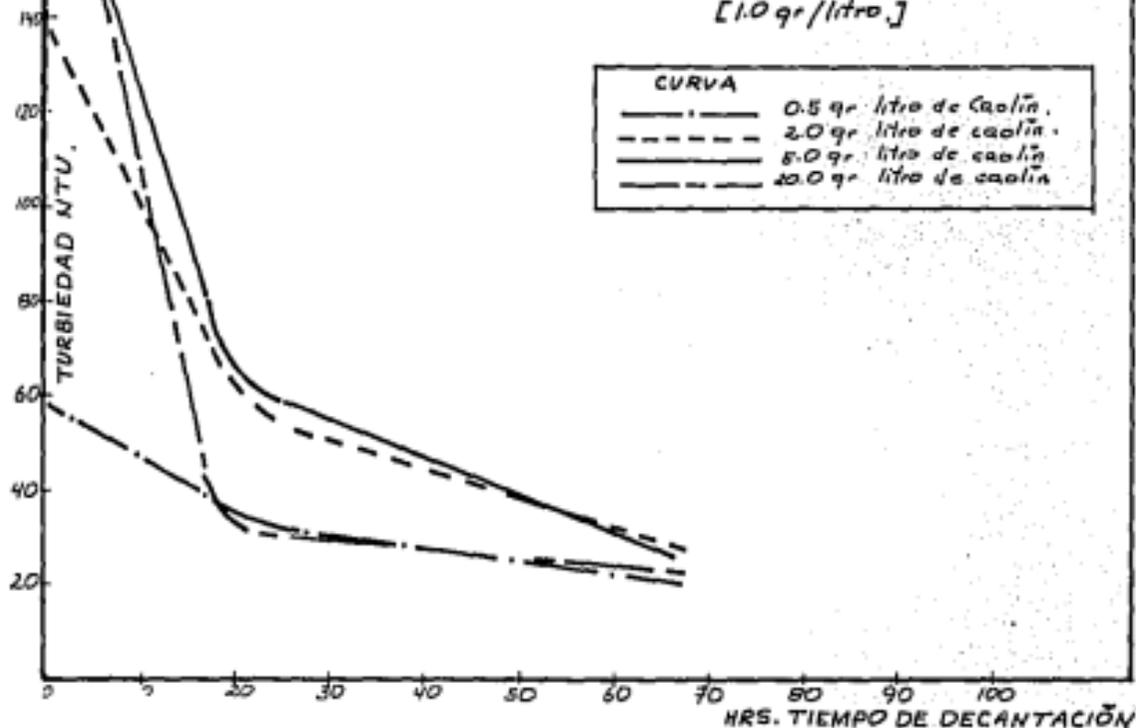


FIGURA N° 21

RESULTADOS DE PRUEBAS VARIANDO CONCENTRACION DE CAOLIN

DOSIS CONSTANTE DE OXALATO DE SODIO

[1.0 gr/litro.]



VII METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE RESULTADOS

7.1. Introducción

En este Capítulo se pretende, basados en las referencias que a continuación se indican, proponer una guía o método para el análisis e interpretación de los datos obtenidos, al efectuarse las carreras de filtración en una investigación posterior y complementaria de la presente.

Las referencias consultadas son: "Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua" de J. Arboleda CEPIS. (Ref. # 14); "The Application of Filtration Theory to Pilot-Plant Design" de Avner Adin, E. Robert Baumann y John L. Cleasby (Ref. # 6); y muy especialmente, se sigue la metodología de análisis utilizada en investigación publicada por Avner Adin y Menahem Rebbun, en artículo intitulado "High-Rate Contact Flocculation-Filtration With Cationic Polyelectrolytes" (Ref. # 4).

7.2 Desarrollo

En el capítulo IV del presente trabajo se definieron como variables experimentales las siguientes:

- Características y espesores de los medios filtrantes;
- tasas o velocidades de filtración;
- tratamiento químico o condiciones de dosificación; y
- requerimientos de retrolavado.

Una variable adicional que se considera implícita se refiere a la turbiedad del agua a emplear en cada prueba de filtración.

Dichas variables deben ser evaluadas de acuerdo a su influencia en los siguientes parámetros, también ya definidos en el mismo Capítulo IV, a saber:

- capacidad de retención del filtro;
- capacidad hidráulica del filtrado;

- gradiente de carga hidráulica; y
- duración del ciclo de filtrado

Las diferentes combinaciones de las variables experimentales definen las 12 pruebas de filtración ya sugeridas.

La determinación de los anteriores parámetros, por otro lado, conlleva la siguiente secuencia o procedimiento de cálculo e interpretación de resultados:

- determinación de las etapas que tienen lugar durante la filtración directa;
- efectos de la condición de dosificación de coagulantes en un tiempo dado;
- efectos de la velocidad de filtración a una profundidad fija del lecho;
- caracterización del floc obtenido en cada prueba;
- caracterización de la operación de las diferentes capas o estratos del lecho filtrante;

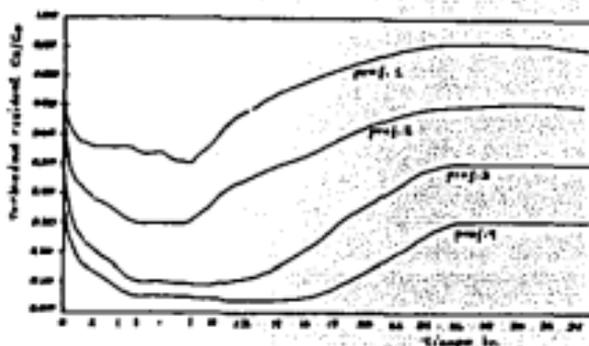
- Determinación del avance del frente de impedimento en el lecho filtrante a través del tiempo; y
- Determinación de la profundidad óptima de operación de cada lecho filtrante.

Todo lo anterior estaría dirigido a cumplir con el objetivo central de evaluar la eficiencia de dos lechos filtrantes de características disímiles, para diferentes condiciones de operación.

7.2.1. Etapas de la Filtración Directa

Para cada prueba de filtración y a diferentes profundidades de los lechos filtrantes, es posible obtener datos de turbiedad a intervalos de tiempo predeterminados. Con estos valores y obteniendo la relación C_n/C_0 , se logra, para cada carrera y lecho filtrante, un conjunto de curvas, similares a las mostradas a continuación:

Figura # 22



En donde,

C_n = turbiedad en el punto de muestreo "n", correspondiente a una cierta profundidad del lecho, en un tiempo dado.

C_o = turbiedad inicial o influente de los filtros.

Según se muestra en la figura anterior, se presentan claramente diferenciadas tres etapas a lo largo de la prueba.

Adin y Rebhun (Ref. # 14) señalan que la filtración

directa puede ser dividida en tres etapas sucesivas en-

función del tiempo de filtrado a saber:

Una etapa inicial ("working in stage"), durante la cual la turbiedad del agua filtrada alcanza rápidamente un bajo valor. Este punto a su vez, marca el comienzo de una etapa intermedia, denominada por ellos ("working stage"), la cual es considerada como la etapa efectiva de operación del filtro.

Varias horas después, si la carrera no finaliza por haberse alcanzado la máxima pérdida de carga, la turbiedad residual aumenta, desarrollándose la etapa final de operación o ("breakthroughstage"). Si se prolonga la misma, la curva se torna asintótica al eje de las abscisas para un valor de C_m/C_0 constante.

El definir claramente las diferentes etapas para cada leche y las condiciones particulares de cada prueba permitirá comparar los dos medios filtrantes. Un filtro con una etapa intermedia de operación mayor reflejará condiciones más favorables y un mejor aprovechamiento del leche.

7.2.2. Efecto de la condición de dosificación de coagulantes

Acorde a lo ya definido se establecieron dos condiciones de dosificación diferentes:

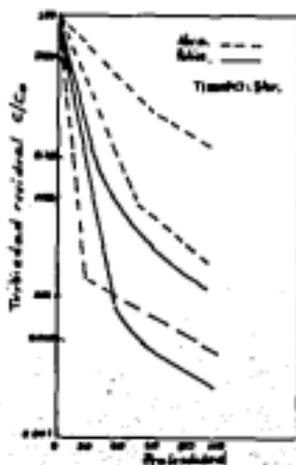
- condición de dosificación A, en la cual se emplea únicamente polielectrolito catiónico; y
- condición de dosificación B, en la cual se emplea Sulfato de Aluminio, como coagulante principal y polielectrolito catiónico como ayuda-coagulante.

En base a lo anterior y para un tiempo dado, por ejemplo cinco horas, es posible graficar la profundidad del lecho en las abscisas y turbiedad residual en las ordenadas. Se obtendrían entonces curvas para cada lecho filtrante, de carreras de filtración efectuadas en condiciones diferentes de dosificación pero a turbiedades influentes y tasas de filtración similares, para un mismo tiempo. Ver ejemplo en Fig. # 23.

Para cada tiempo de operación que se desee, se podría elaborar un conjunto similar de curvas.

Lo anterior permite comparar la eficiencia de las condiciones de dosificación empleadas, pudiéndose relacionar con la etapa en que se encuentre operando el filtro. Los tiempos de inicio y término de las diferentes etapas, que han sido obtenidos mediante inspección visual de las curvas del apartado anterior (Fig. # 22), podrían ser utilizados como referencia para trazar las curvas y comparar los diferentes coagulantes empleados

Figura # 23



7.2.3. Efecto de la velocidad de filtración

Inicialmente se habían establecido dos tasas o velocidades de filtración, a saber:

- tasa de filtración alta, de 6 Lcs/m^2 (velocidad de filtración de 21.6 m/h , denominada V_1); y
- tasa de filtración normal, de 3.4 Lcs/m^2 (velocidad de filtración de 12,24 m/h , denominada V_2 .)

Para comparar el efecto de la variación de la velocidad de filtración en los dos filtros, se obtiene una relación entre el volumen filtrado en m^3/m^2 y la pérdida de carga.

El volumen filtrado, se define como la altura de la columna de agua que pasa a través del filtro desde el comienzo del ciclo, es decir,

$$\text{Volumen filtrado} = \frac{Vt}{A}, \text{ con unidades } \text{m}^3/\text{m}^2$$

Donde,

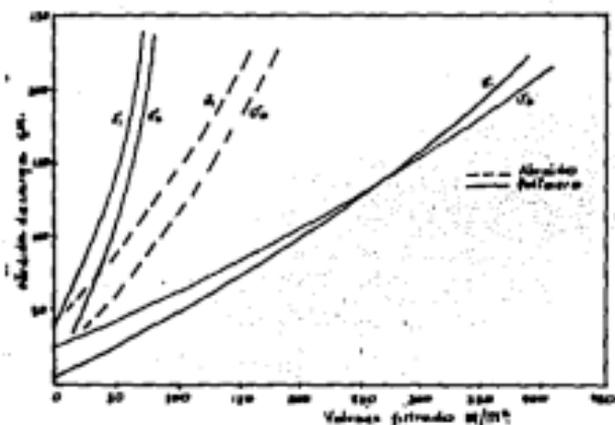
A = área de la sección transversal del lecho filtrante

Vt = volumen total filtrado desde el inicio de la carrera
a un tiempo "t" determinado.

De acuerdo con Adin y Rebhun, cuando se va a comparar el comportamiento de las carreras de filtración a diferentes velocidades de flujo, es preferible el empleo del volumen filtrado a la utilización del tiempo.

Graficando entonces en las abscisas el volumen filtrado (en m^3/m^2) y en las ordenadas la pérdida de carga correspondiente, se obtienen un conjunto de curvas, todas para una profundidad fija del lecho analizado; para varias carreras de filtración y condiciones de dosificación diferentes. A manera de ejemplo ver curvas mostradas en la Fig. # 24.

Figura # 24



7.2.4. Caracterización del floc obtenido en cada prueba

A efectos de evaluar las características del floc a lo largo de una prueba de filtración, Arboleda (Ref. # 14) propone el cálculo del índice de eficiencia dado por la relación siguiente:

$$I_e = \bar{x} t_e$$

en donde,

$\bar{\lambda}$ = módulo de impedimento promedio

t_2 = longitud de la carrera de filtración hasta que se alcanzan la máxima pérdida de carga permisible (en horas)

El valor de $\bar{\lambda}$ se calcula, a su vez, mediante la expresión:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum T_A - \sum T_E}{\sum T_A \cdot L}$$

en donde,

$\sum T_A$ = turbiedad total afluente (NTU)

$\sum T_E$ = turbiedad total efluente (NTU)

L = profundidad del lecho filtrante (cm)

El valor de $\sum T_A$ se obtiene sumando todos los valores de la turbiedad que entró al filtro hora a hora.

El valor de $\sum T_E$ se deriva sumando todos los valores de la turbiedad efluente del filtro hora a hora.

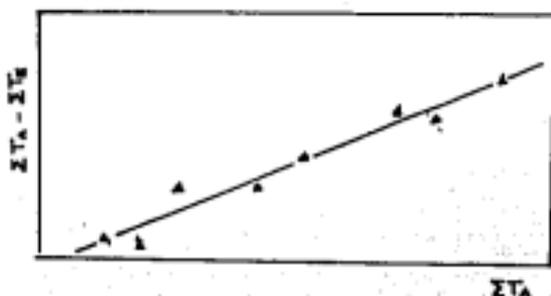
Efectuando los cálculos, $\bar{\lambda}$ quedará expresando en cm y el $\bar{\lambda}$ en horas/cm.

Durante el proceso de filtración el floc debe tener ciertas características de dureza, necesaria para resistir los esfuerzos cortantes producidos dentro del lecho filtrante. Si el floc es blando o débil, la pérdida de carga es baja pero el proceso debe interrumpirse al deteriorarse la calidad del efluente.

De acuerdo al análisis de Arbolada, un índice de eficiencia bajo es indicativo de un floc blando y por consiguiente de una carrera de corta duración. Un índice de eficiencia alto va aparejado a un floc duro y una carrera de duración mayor.

También es posible establecer una relación entre turbiedad afluente a diferentes intervalos de tiempo ($\sum T_A$) y la turbiedad retenida en los filtros ($\sum T_A - \sum T_e$) para cada carrera de filtración, de acuerdo a como se muestra en la siguiente Figura # 25, como ejemplo:

Figura # 25



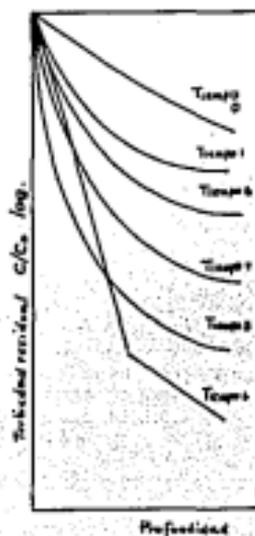
De acuerdo a la Figura anterior, la turbiedad retenida debe ser directamente proporcional a la turbiedad afluyente si se tiene un floc duro. Por el contrario, si la proporcionalidad no está bien definida es indicativo de un floc blando.

7.2.5. Caracterización de la operación de los estratos del lecho filtrante

Conforme transcurre una carrera de filtración, el floc

va penetrando en profundidad en el lecho filtrante. Se da un frente estable de avance del material removido en el lecho. Si se grafica, para cada carrera de filtración, en las abscisas la profundidad del lecho y en las ordenadas el logaritmo de la turbiedad residual C/C_0 , es posible obtener un conjunto de curvas, cada una para un tiempo correspondiente, similares a las mostradas en el ejemplo de la Figura # 26 (Ref. # 4).

Figura # 26



En la figura anterior se observan regiones de alta y baja eficiencia definidas por las pendientes de las curvas. Los valores absolutos de las pendientes de cada sección representan el coeficiente de filtración definido por la ecuación de Iwasaki, a saber

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C$$

en donde,

C = concentración de la suspensión o turbiedad

λ = coeficiente de filtración

L = profundidad del lecho

Si t es constante y se integra entre las capas i , e $i+1$, se obtiene la expresión

$$\lambda = \frac{\ln(C_i/C_o) - \ln(C_{i+1}/C_o)}{L_{i+1} - L_i} \quad (\text{Ref. N}^\circ 4)$$

El valor de λ mencionado en el apartado 7.2.4. y propuesto por Arboleda, se refería al módulo de impedimento pro-

medio y tiene una connotación y procedimiento de cálculo diferente al λ de la expresión anterior señalado por A. Adin y M. Rebbun. En el primer caso, dicho valor se obtiene para el cálculo del índice de eficiencia (I_e) para todo el lecho filtrante y se utiliza, para definir o caracterizar el floc obtenido a lo largo de una carrera de filtración. En el segundo caso el coeficiente de filtración λ señalado por Adin y Rebbun y derivado de la ecuación de Iwanaki, se calcula para los diferentes estratos o capas determinadas en los lechos filtrantes en estudio, y como se verá, refleja las condiciones de operación, en un determinado tiempo de dichas capas.

Aplicando la ecuación anterior es posible calcular los valores de λ para cada capa y a determinados intervalos de tiempo; por ejemplo el valor de λ máximo en un tiempo dado y el valor de λ_0 correspondiente al tiempo '0' .

La interpretación a seguir con respecto a los valores de λ derivados, se refiere a las condiciones de operación de las capas del lecho filtrante. El valor de λ máximo en un tiempo dado, nos indica la capa que está trabajando en ese tiempo. El coeficiente obtenido para capas que recién han acabado su trabajo, presenta valores bajos. El valor λ también es bajo, cuando una capa no ha tenido un trabajo significativo.

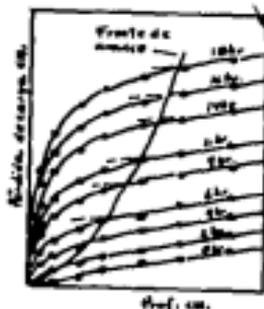
7.2.6. Determinación del avance del frente de impedimento

De acuerdo con Hudson (Ref. # 15), el avance del frente de impedimento u obstrucción del lecho, puede ser determinado, encontrando y graficando los puntos de inflexión de las curvas de pérdidas de carga vs. profundidad del lecho, obtenidos para diferentes tiempos y para las condiciones particulares de cada prueba.

Dicho procedimiento es utilizado posteriormente por Avner Adin y Menahem Rebbun en su investigación (Ref. # 4) y finalmente por Adin, Baumann y Glassby (Ref. # 6)

En la siguiente Figura #27 se muestra, como ejemplo, la obtención de los puntos que definen el frente de impedimento, por medios gráficos, para una carrera de filtración. El frente es definido por los puntos donde el gradiente comienza a desviarse significativamente de los valores para un lecho liso.

Figura # 27

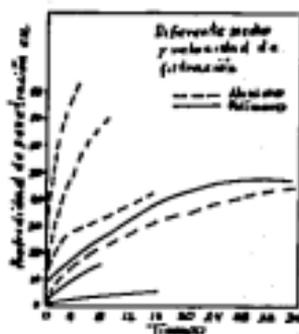


En la Figura # 28 se grafican los puntos obtenidos de la Figura anterior, para cada carrera de filtración.

En las abscisas se presenta el tiempo de filtración y en las ordenadas la penetración del floc o avance del frente, derivándose una curva para cada carrera de filtración.

Aún cuando no hay correspondencia entre ambas figuras por provenir de referencias diferentes, se presentan como un ejemplo de análisis pertinente para obtener la tasa de avance del frente de obstrucción o inmedimento.

Figura # 28



La pendiente aproximada o promedio de cada curva de la

figura anterior, daría la tasa de avance promedio para cada carrera de filtración en cm/hr. ; como interpretación de los resultados que se obtengan, se puede mencionar que una baja tasa de avance del frente es indicativa de una carrera de duración mayor y un mejor aprovechamiento de lecho filtrante en profundidad.

7.2.7. Determinación de la profundidad óptima de operación del lecho filtrante

Es posible optimizar gráficamente la longitud o duración de la carrera de filtración, a efectos de comparar la profundidad requerida de lecho para los dos filtros y evaluar su comportamiento para las diferentes condiciones de operación.

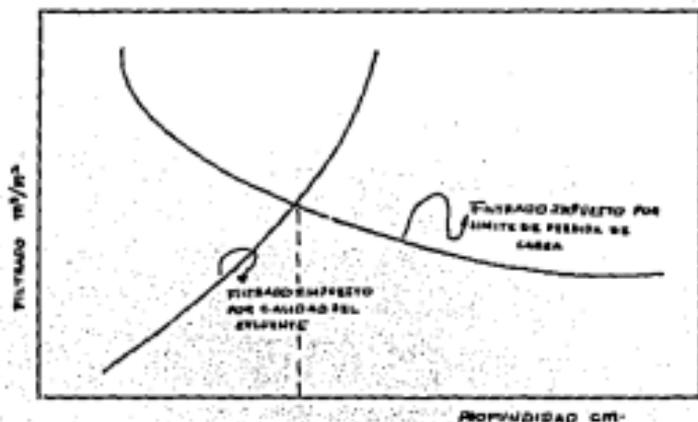
La profundidad óptima para un conjunto dado de condiciones, se encuentra como la intersección de dos curvas.

Una de ellas de volumen filtrado/m² en relación a la turbiedad, donde cada punto representa la cantidad de agua que pasa antes de que se alcance, para diferentes profundidades del lecho, el límite de calidad en el efluente ("breakthrough"), que ha sido establecido. La otra curva se refiere al volumen filtrado/m² en relación a la pérdida de carga, donde cada punto representa, a diferentes profundidades del lecho, la cantidad de agua que pasa hasta que la pérdida de carga alcanza el límite permisible. Dado que no todos los estratos del lecho filtrante operan en las mismas condiciones y no en todos se llega a las condiciones límite, es necesario determinar algunos puntos por extrapolación directa de la curva.

En la siguiente Figura # 29 se muestra, a manera de ejemplo, el procedimiento gráfico a seguir para determinar la profundidad óptima del lecho filtrante. Dicho procedimiento se aplicaría para cada carrera de filtración y

para cada lecho filtrante.

Figura # 29



Las condiciones más favorables de operación, a efectos de comparar los dos lechos filtrantes, serán aquellas para las cuales se requiera una menor profundidad del lecho, es decir aquellas en que la profundidad óptima sea menor.

VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Aun cuando dentro de lo que ha sido el diseño del experimento de filtración directa, se han definido claramente las variables y condiciones de las pruebas a efectuarse posteriormente con los dos filtros piloto; quedará a criterio de las personas encargadas de darle continuidad y efectuar la parte medular de la presente investigación, el adoptar los cambios que se estimen necesarios. Inclusive, de acuerdo a la información generada por las primeras carreras de filtración que se lleven a cabo, podría considerarse pertinente cambiar los valores de algunas variables de las carreras subsiguientes o también, si fuera del caso, modificar algunos aspectos del procedimiento experimental y operación de los filtros.

Lo anterior, sólo podrá apreciarse a cabalidad a la luz de la experiencia de las primeras carreras de filtración.

Dentro de lo que ha sido la investigación llevada a cabo

para la preparación de una suspensión, lo suficientemente estable que logre simular en gran medida lo que es el parámetro turbiedad de un agua natural y que resulte adecuada para su empleo como influente a los filtros, se puede mencionar:

a) es difícil que una arcilla natural, analítica o con algún grado de preparación industrial pueda, sin ningún aditivo incorporado, mantener alguna estabilidad en suspensión en agua de la llave;

b) el pretender agregar todos los componentes físicos que presenta un agua superficial turbia, para lograr obtener el equilibrio físico-químico necesario para formar una suspensión coloidal estable en el laboratorio, es realmente complicado y oneroso, máxime si se requirieren como en el caso presente, grandes volúmenes de agua para la prueba de los filtros piloto; inclusive dicho equilibrio corresponde a condiciones creadas por la naturaleza durante muchos

años;

c) una salida viable para la preservación del agua sintética fue el empleo de los defloculantes o dispersantes los cuales, como se vió, producen en algunos casos, resultados favorables; y

d) no todos los compuestos químicos actúan como defloculantes, siendo específicos para el tipo y composición de la arcilla en cuestión.

Para la suspensión de caolín, tanto el Hexametáfosfato de Sodio como el Meta-Silicato de Sodio producen buenos resultados.

Para las pruebas de filtración directa, con el fin de lograr turbiedades de 10 y 20 NTU, se recomienda la utilización del Hexametáfosfato de Sodio en dosis de 0.05 gr/lit.

Para lograr las turbiedades de 100 NTU se puede utilizar Meta-Silicato de Sodio en dosis de 0.1 gr/litro.

Para otro tipo de pruebas en que se desearan turbiedades

mayores a 100 NTU no se recomienda el uso del defloculante tal y como ha sido planteado aquí. Se requeriría profundizar la investigación y quizás utilizar otro marco y metodología experimental.

8.2. Recomendaciones

Finalmente, en lo referente a la operación de las columnas filtrantes que se efectuaría posteriormente y a través de los elementos ya adquiridos en el diseño y construcción del modelo experimental, se considera prudente recomendar lo siguiente:

Que los filtros sean operados en conjunto por dos o tres personas considerando, por un lado, la duración de las carreras de filtración y por otro, las numerosas actividades y controles de operación que deben ser llevados a cabo y en ocasiones de manera simultánea.

La incorporación en el efluente de ambas columnas filtrantes de una restricción o regulador de gasto (un orificio por ejemplo) para evitar oscilaciones bruscas

en los niveles de agua correspondientes.

De ser posible, adicionarse un dispositivo para mantener el gasto influente a ambas columnas filtrantes constante o bien, en su defecto, instalar en la tubería condá, antes de la dosificación, un medidor de gasto. Este último tendría el propósito de dar una lectura rápida del gasto total y de inmediato, si fuera necesario, ajustarlo a las condiciones deseadas.

Las tasas y duración del retrolavado, aún cuando se dan recomendaciones al respecto, es conveniente fijarlas en base a pruebas previas.

Al mismo tiempo, la apertura de válvulas de aire y agua en el lavado debe ser mínima y efectuarse cuidadosamente para evitar presiones excesivas sobre los filtros e instalación hidráulica.

Para la determinación de la dosis adecuada de los coagulantes a ser empleados, previamente a la realización de cada carrera de filtración, se presenta en la

Fig. # 30 incluida en el Anexo, el procedimiento recomendado.

Se recomienda también una fórmula tipo para anotar los datos obtenidos en el transcurso de cada carrera de filtración (ver Anexo.)

REFERENCIAS

- 1.- Apuntes del Curso "Plantas de Tratamiento para Agua Potable" DEFFI-UNAM impartido por el M.enI. Gastón Mendoza.
- 2.- R. L. Culp "Direct Filtration" AWWA, Journal Julio 1977.
- 3.- Susumu Kawamura "Design and Operation of High Rate Filters" Part 1, AWWA, Journal Octubre 1975.
- 4.- Avner Adin y Menahem Rebhun "High-Rate Contact Flocculation-Filtration with Cationic Polyelectrolytes" AWWA, Journal Febrero 1974.
- 5.- Committee Report "The Status of Direct Filtration" AWWA, Journal Julio 1980.
- 6.- Avner Adin, E. Robert Baumann and John L. Glesby "The Application of Filtration Theory to Pilot-Plant Design" AWWA, Journal Enero 1979.
- 7.- W. Hutchison y P. D. Foley "Operational and Experimental Results of Direct Filtration " AWWA, Journal Febrero 1974.

- 8.- R. G. Tredgett "Direct Filtration Studies for Metropolitan Toronto" AWWA, Journal Febrero 1974
- 9.- Charles M. Spink y J. T. Monsovitx "Design and Operation of a 200 mgd. Direct Filtration Facility" AWWA, Journal Febrero 1974.
- 10.- Carol H. Tate, John S. Lang and Harvey L. Hutchinson "Pilot Plant Tests of Direct Filtration" AWWA, Journal Julio 1977
- 11.- Vernon L. Stump y John T. Novak "Polyelectrolyte Selection for Direct Filtration" AWWA, Journal Junio de 1979
- 12.- Helmut Jung y E. S. Savage "Deep-Bed Filtration" AWWA, Journal Junio de 1979
- 13.- George E. Sweeney y Paul W. Prendiville "Direct Filtration: An Economic Answer to a City's Water Needs" AWWA, Journal Junio de 1979
- 14.- Jorge Arboleda "Teoría, diseño y control de los Procesos de Clarificación del Agua" CEPIS #13. 1973

- 15.- H.E. Hudson Jr. "Physical Aspects of Filtration"
AWWA; Journal Enero 1969
- 16.- E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez "Fundamentos
de la Mecánica de Suelos" Tomo I, México 1963.
- 17.- Fair, Geyer, Okun "Abastecimiento y Remoción de Aguas
Residuales" Tomo I, Editorial Limusa; México 1973
- 18.- T. W. Lambe "Soil Testing for Engineers" Wiley,
New York
- 19.- A. P. Black y Sidney A. Hannah "Electrophoretic
Studies of Turbidity Removal Coagulation With
Aluminium Sulfate" AWWA, Journal Abril 1961
- 20.- H. van Olphen "An Introduction To Clay Colloid
Chemistry" Interscience Publishers H. John Wiley &
Sons, 1963.
- 21.- O'Melia C. R. y Stumm, W. Theory of Water Filtration
Jour. AWWA. 59:11:1393 (Nov. 1967).

- 22.- Mintz, D. M. Modern Theory of Filtration Special subject No. 10. IWSA Congress in Barcelona (1966)
- 23.- Herzig J. P. ; Leclerk, D. M.; & Le Goff, P. Flow of Suspensions Through Porous Media-Aplication to Deep Filtration. Indt. & Engrg. Chemistry, Res. , 6:527 (Mayo, 1970)
- 24.- Stumm, W. & Morgan, J. J. Chemical Aspects of Coagulation Jour. ANWA, 54:8:971 (Agosto, 1962).

ANEXOS

PROCEDIMIENTO I

- Se disuelve en un litro de agua (destilada o de la llave) un gramo de la arcilla correspondiente.
- Se preparan 6 vasos de precipitados con las condiciones indicadas en el Cuadro # 11. Se debe aclarar que la concentración de la arcilla en agua de 1 gr/litro fue seleccionada arbitrariamente. Únicamente se procuró que fuera lo suficientemente alta para lograr en un inicio, ciertas condiciones de saturación del medio líquido y obtener por lo menos al inicio de la prueba, altos valores de turbiedad.

Cuadro # 11

Condiciones de Preparación de la Suspensión
para la Selección de la Arcilla

# Prueba	Arcilla empleada	Concentrac. gr/lit.	Tipo de Agua
1	Caolín Analítico	1	Llave
2	Caolín Analítico	1	Destilada

Continuación Cuadro # 11

# Prueba	Arcilla Esplenda	Concentr. gr/lt.	Tipo de Agua
3	Bentonita	1	Ilave
4	Bentonita	1	Destilada
5	Arc. de Michoacán	1	Ilave
6	Arc. de Michoacán	1	Destilada
7	Arc. Montmorilonítica	1	Ilave
8	Arc. Montmorilonítica	1	Destilada

Todas las jarras se colocan en un equipo de prueba de jarras y se agita la suspensión durante 20 minutos a 90 r.p.m.

- Se dejan sedimentar las suspensiones durante el periodo de 4 horas.

- Después del periodo inicial de decantación, se determina la turbiedad del sobrenadante durante un tiempo adecuado. La muestra del sobrenadante se toma cuidadosa-

mente empleando una vineta graduada con el fin de evitar la resuspensión de material ya decantado que pudiera alterar los resultados.

La turbiedad se determina empleando turbidímetro HACH Modelo 2100 A. y se obtiene en unidades nefelométricas.

- Los datos obtenidos se grafican, obteniéndose curvas de tiempo de decantación vs. turbiedad del sobrenadante.

PROCEDIMIENTO II

- Se hierve durante una hora la arcilla suscitada con 10% de H_2SO_4 concentrado, para inducir el fraccionamiento de los cristales de caolín y la disolución de los iones orgánicos e inorgánicos que se encuentran como impurezas en la muestra.
- Se separa por decantación el material sólido, lavando con agua destilada repetidas veces, hasta lograr una solución con pH 6.
- Se seca el residuo a $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ durante el tiempo que sea necesario, hasta secar totalmente el material y obtener una torta seca de caolín.
- Se muele la torta seca con un mortero hasta producir un polvo muy fino (malla # 350.). Para ello se debe humedecer la torta con alcohol y secar después a $70^{\circ} - 80^{\circ}C$.
- Para los ensayos posteriores, se mezcla el caolín pres-

rado con agua corriente y se deja decantar durante 3 horas para separar las partículas más gruesas.

Se verifica la estabilidad de la suspensión, determinando a ciertos intervalos de tiempo la turbiedad del sobrenadante.

PROCEDIMIENTO III-a

a) Determinación de rango de dosis adecuada de defloculante en tubos Nessler de 50 ml., mediante observación visual.

b) Verificación de la estabilidad de las suspensiones empleando los defloculantes en las dosis seleccionadas y mediante el uso de vasos de precipitados.

c) Efecto de la variación de la concentración de arcilla para una dosis constante de defloculante.

En el primer caso se siguen los pasos siguientes (III-a):

- Se prepara una serie de tubos Nessler de 50 ml. con una suspensión de caolín en agua de la llave. La concentración de caolín es alta para facilitar la inspección visual posterior (mayor o igual a 10 gr./lt.).

- Se agrega el coagulante o defloculante en el tubo

Nessler en la concentración deseada.

- Se agitan vigorosamente los tubos durante unos 2 o 3 minutos cada uno o bien hasta que se aprecie una adecuada disolución del defloculante en la suspensión y una mezcla homogénea.

- Se colocan todos los tubos en una gradilla anotando la hora y día de inicio de la decantación.

- Sin mover los tubos de su sitio, a intervalos definidos de tiempo; se aprecia, visualmente las condiciones de la suspensión en lo que se refiere a turbiedad y localización de la interfase entre la zona superior o sobrenadante más clara y zona inferior más turbia.

- Se continúan las observaciones durante un mínimo de 3 días y se seleccionan las dosis del defloculante para las cuales se logra una suspensión más estable.

PROCEDIMIENTO III-b

- Se prepara un volumen adecuado de caolín con agua de la llave en concentración de 1 gr/litro, agitando en una licuadora de alta velocidad de rotación, durante 5 minutos
- Se distribuye la suspensión obtenida en el uso anterior en una serie preparada de vasos precipitados de 1000 ml.
- Se agrega el defloculante en la dosis correspondiente y se agitan los vasos en un equipo de prueba de jarras a 100 r.p.m. durante 20 minutos.
- Se deja decantar la suspensión durante 3 horas. Inmediatamente después se efectúa la primera medición de turbiedad del sobrenadante y se anota como correspondiente a un tiempo "0".
- A diferentes intervalos de tiempo, hasta un período total de aproximadamente 74 horas, se efectúan mediciones de turbiedad del sobrenadante de cada suspensión.

PROCEDIMIENTO IV

- Se debe contar con un matraz aforado de 500 cm³ de capacidad. El mismo debe calibrarse determinando su peso, lleno con agua destilada, a diferentes temperaturas del líquido.

- Se selecciona del material filtrante a analizar, una muestra de aproximadamente 100 gr. de sólidos, constituida por los retenidos del análisis granulométrico, en la misma proporción en que serían empujados en la columna de filtración.

- Se vierten en el matraz aforado aproximadamente 150 cm³ de agua destilada.

- Por medio de un embudo se transfiere el material al matraz aforado. El material se debe sacar previamente en el horno durante 24 horas a 105 °C, aproximadamente.

- Se aplica vacío al matraz para extraer el aire en suspensión durante un tiempo mínimo de 15 minutos. Se agita el

matraz suavemente para facilitar la expulsión del aire.

- Se agrega cuidadosamente agua destilada en cantidad suficiente hasta que alcance la parte inferior del cuello del matraz. El agua debe escurrir lentamente por el cuello para evitar la formación de burbujas.

- Se mide la temperatura dentro del matraz con precisión de 0.1 °C, en varios puntos del mismo.

Se puede en caso de haber variación, tomar un promedio de las lecturas.

- Se seca cuidadosamente el matraz por el exterior

- Se agrega suficiente agua destilada para que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración.

- Se seca cuidadosamente el interior del cuello del matraz arriba del menisco.

- Se pesa el matraz, el material filtrante y el agua con precisión de 0.01 g. (W_{WWS}).

- Se vierte todo el contenido del matraz en una capsula. Se enjuaga con agua destilada para que no queden partículas en su interior y se seca al horno.
- Se determina el peso seco de los sólidos (W_s).
- Se calcula la densidad de sólidos a partir de la fórmula

$$S_s = \frac{W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}}$$

en donde,

S_s = densidad de sólidos ó gravedad específica

W_s = peso del material secado al horno

W_{bw} = peso del matraz + agua, a la temperatura dada. Se obtiene de la curva de calibración del matraz.

W_{bws} = peso del matraz + agua + muestra a la temperatura dada.

NOTA: en el caso de algunos suelos no cohesivos gruesos (como la arena y antracita), el peso seco de los sólidos (W_s) pue

de obtenerse secando el material en el horno antes de la prueba y cuidando de no perder sólidos en ninguna etapa de la misma.

Los resultados obtenidos para cada una de las muestras se presentan en el Cuadro # 8.

PROCEDIMIENTO V

- Se vierten 1000 ml. de agua destilada en una probeta
- Se marca en la probeta una altura (h) arbitraria.
- Se agregan unos cuantos granos (tres o cuatro) del medio filtrante para el tamaño considerado, anotándose el tiempo inicial (t_0) y el tiempo que tardan en alcanzar la marca (t).
- Se calcula la velocidad de sedimentación (V_s) mediante la expresión,

$$V_s = h/t - t_0$$

- Se determina la velocidad de sedimentación en cm/seg. de partículas esféricas con diámetro (d_0) y volumen equivalente al de partículas de tamaño d_0 . A este parámetro se le denomina V_0 y se calcula empleando la expresión dada por la ley de STOKES,

$$V_0 = \frac{g}{18} \cdot \left[\frac{S_0 - 1}{\nu} \right] \cdot d_0^2$$

en donde,

V_0 = velocidad de sedimentación ya mencionada.

g = aceleración de la gravedad (981 cm/seg^2)

S_s = peso específico

ν = viscosidad cinemática (cm^2/seg) para la temperatura del agua.

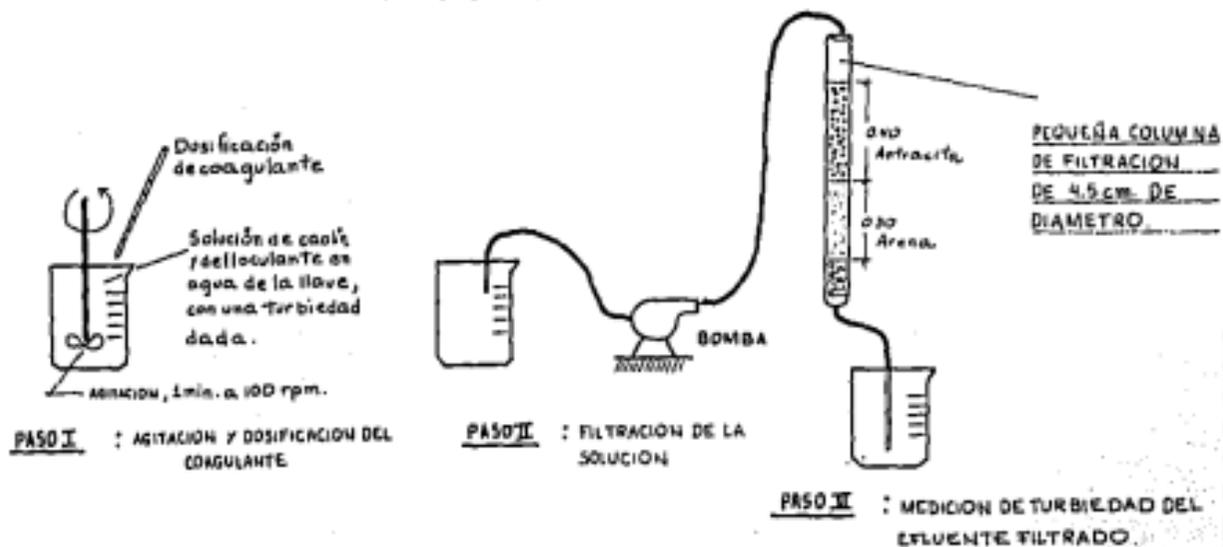
d_a = diámetro real de la partícula, tomando como promedio de las aberturas de las mallas consecutivas (la malla que pasó y la malla en la que la partícula quedó retenida). Se expresa en cm.

Posteriormente se revisa el número de Reynolds Re , calculado con la expresión $Re = \frac{d_a \cdot V_0}{\nu}$, sea menor que uno, lo cual avala el resultado obtenido para V_0 . Si no se recalcula el valor de V_0 de acuerdo a procedimiento indicado por los autores Fair, Geyer y Okun (Ref. # 17).

Finalmente se calcula la esfericidad, denotada por ϕ aplicando la ecuación $\phi = (V_s/V_0)$

FIGURA N°30

PASOS A SEGUIR EN LA DETERMINACION DE DOSIS OPTIMA DE COAGULANTES PARA PRUEBAS DE FILTRACION DIRECTA



NOTA : Luego de finalizar el filtrado, la columna de 4.5 cm. de diámetro es retrolavada con agua con el fin de acondicionarla para la siguiente prueba.

BIBLIOGRAFIA

1. Boyd, Russell H y Wriganska M. Ghosh, "An Investigation of the Influences of Some Physicochemical Variables on Porous-Media Filtration". AWWA, Journal (Febrero 1974).
2. Glessby, John L. y E. Robert Baumann "Selection of Sand Filtration Rates" AWWA, Journal (Mayo 1962)
3. Foley, Paul D. "Experience with Direct Filtration at Ontario's Lake Huron Treatment Plant" AWWA, Journal (Marzo 1980).
4. Houan-Hsien Neh y Wriganska M. Ghosh "Selecting polymers direct filtration" AWWA, Journal (Abril 1981).
5. Hutchison, W. R. "High-Rate Direct Filtration" AWWA, Journal (Junio 1976).
6. Monsewitz, J. T. , D. J. Rexing, E. G. Williams y J. Heekler "Some Practical Experience in Direct Filtration" AWWA, Journal (Octubre 1978).

7. Letterman, Raymond y otros, "Direct Filtration Using Polyelectrolyte Coagulants" AWWA, Journal (Junio 1979)
8. Logsdon, Gary R., Robert A. Clark y Carol H. Tate "Direct Filtration Treatment Plants: Costs and Capabilities" AWWA, Journal (Marzo 1980).
9. Rice, Archie H. "High-Rate Filtration" AWWA, Journal (Abril 1974).
10. Rebeck, Gordon G. , Kenneth A. Dostal y Richard L. Woodward. "Studies of Modifications in Water Filtration" AWWA, Journal (Febrero 1964).
11. Robinson, Correl W. Jr. "Polyelectrolytes as Primary Coagulants for Potable-Water Systems" AWWA, Journal (Abril 1974).
12. Treweek, Gordon P. "Optimization of Flocculation Time Prior to Direct Filtration" AWWA, Journal . (Febrero 1979).