



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"COMPORTAMIENTO GEOTECNICO DE
UNAS LAGUNAS FACULTATIVAS
CON RECIRCULACION"

T E S I S
Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL
p r e s e n t a

MARIA PANTALEON CORTEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. en ING. RAFAEL MORALES Y MONROY

MEXICO, D.F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

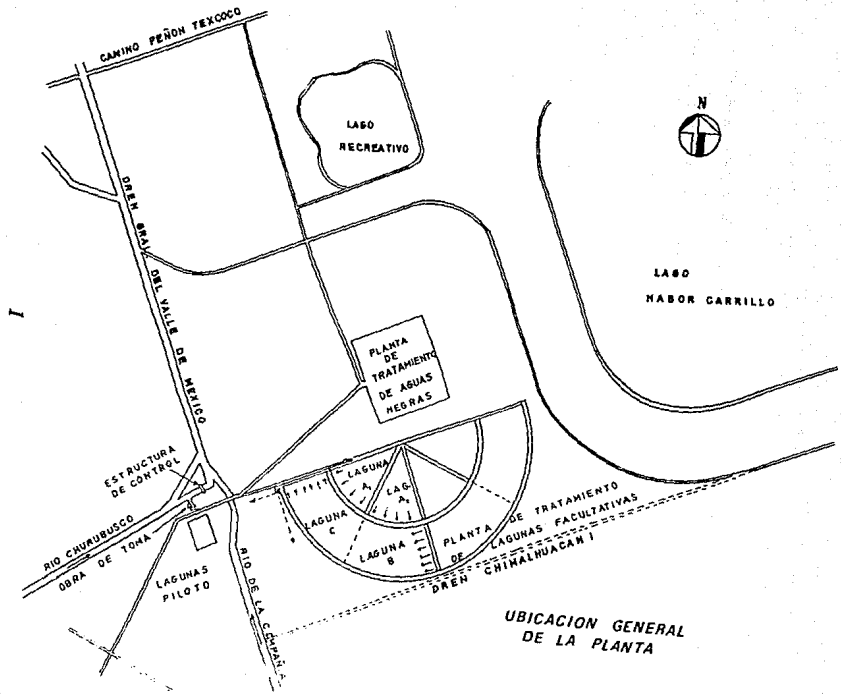
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

" COMPORTAMIENTO GEOTECNICO DE UNAS LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION "

INDICE

1.- INTRODUCCION	2
2.- ANTECEDENTES	7
2.1.- SITUACION GEOGRAFICA	9
2.2.- CLIMATOLOGIA	10
2.2.1.- CLIMA	
2.3.- HIDROLOGIA	12
2.3.1.- PRECIPITACION	
2.3.2.- EVAPORACION	
2.3.3.- TEMPERATURA	
2.3.4.- VIENTO	
2.4.- GEOLOGIA	14
3.- ASPECTOS IMPORTANTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LAS LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION	16
3.1.- ASPECTO SANITARIO	16
3.2.- ASPECTO GEOTECNICO	18
3.2.1.- ESTRATIGRAFIA	
3.2.2.- CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL SUELO	
3.3.- TOPOGRAFIA Y PROPIEDADES DEL SUBSUELO	35
4.- PROYECTO, DISEÑO Y CONSTRUCCION	37
4.1.- CRITERIO DE DISEÑO Y CONSTRUCCION	39
4.2.- DESCRIPCION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	43

4.3.- CALCULO DE LA CIMENTACION DEL CARCAMO DE BOMBEO	44
5.- PROCESO DE TRATAMIENTO	48
5.1.- USO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN RIEGO AGRICOLA	51
5.2.- CALIDAD DEL AGUA REUSADA	52
5.3.- EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA	54
6.- COMPORTAMIENTO GEOTECNICO DE LA PLANTA	60
6.1.- ASENTAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA	64
6.2.- BORDO PERIMETRAL	70
6.3.- BORDO RADIAL	70
6.4.- CANAL DE DISTRIBUCION	74
6.5.- FLOTACION DEL CANAL CENTRAL	78
7.- MEDICIONES Y OBSERVACIONES	84
7.1.- FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA	84
8.- CONCLUSIONES	93
9.- BIBLIOGRAFIA	96



UBICACION GENERAL DE LA PLANTA

I.- INTRODUCCION

La planta a la cual se hará referencia, es la planta de tratamiento de Lagunas Facultativas con recirculación; ubicada en el Ex-Lago de Texcoco, Edo. de México, dentro del proyecto Lago Texcoco de la C.N.A., S.R.A. Esta planta fue diseñada para caudales de aguas residuales, en dos etapas; la primera para un gasto de 250 lt/seg, y la segunda para un gasto de 500 lt/seg; para lo cual se utiliza la estructura de toma del río Churubusco construida para la planta de tratamiento de Lodos Activados.

Según estudios realizados, se calcula que para el año 2000, el gasto medio de aguas residuales que cruzará el Ex-Lago de Texcoco, será del orden de 24 m³/seg, por lo que resulta sumamente urgente mediante el tratamiento y reuso de éstas aguas cubrir gran parte de las demandas de todas aquellas actividades que no requieren que el agua sea potable, como es el caso de zonas de riego o Agricultura, entre otras.

Dentro de sus objetivos se menciona, el tratamiento de aguas residuales hasta nivel secundario, utilizando una capa aerobia, otra anaerobia y una tercera facultativa. Este sistema representa una gran economía de energía eléctrica y de equipo. Su limitante pudiera ser la gran extensión de terreno que ocupa 64 Has, pero como se encuentra en el Ex-Lago de Texcoco, esto resulta atractivo, ya que cubre con agua una

zona que podía ser generadora de "tolvaneras"; así esta zona sometida a la intensa evaporación y ayudada por las corrientes de aire que pasan por la zona, e inciden sobre la Cd. de México, tienen un efecto humedificante y atemperador de la agresiva resequedad.

Tomando en cuenta que la zona es atravesada por el Río Churubusco y el Río de la Compañía, los cuales se han convertido en emisores de aguas residuales y dada la escasa disponibilidad de agua en la zona, se pensó en el reuso de esas aguas.

Para ello, se ha planteado como meta a corto plazo construir y operar las plantas necesarias para obtener el agua tratada que sustituya, en el riego agrícola, hasta 4 m³/seg de agua potable, extraída del subsuelo en la zona oriente del ex-lago de Texcoco; de esa manera los pozos ya no se operarán y quedará como reserva el agua subterránea para abastecer las demandas de agua potable que se generen en la zona.

Las Lagunas Facultativas con Recirculación, es la segunda planta de tratamiento que se construyó en la zona federal del ex-lago de Texcoco con una capacidad nominal de 500 lt/seg en 2 fases, y en una superficie de 64 Has.

Las aguas producidas por ésta planta, son ideales para riego, dada la uniformidad de su salida aunada a los bajos consumos de energía eléctrica

comparado con el proceso convencional de Lodos Activados. Estas aguas son ricas en nutrientes debido a las algas producidas en la zona aerobia durante el proceso de tratamiento. Además se ha observado, que a diferencia de las aguas negras directas, éste proceso no "agota" al suelo con el paso del tiempo.

El término "facultativo" está relacionado con la inclusión del oxígeno del aire, dependiendo de su profundidad, ya que pueden actuar para realizar la depuración del agua, tanto bacterias aerobias, como anaerobias y bacterias que tengan la facultad de presentar ambos comportamientos. Adicionalmente el agua tratada se recircula para enriquecer el influente de oxígeno disuelto y evitar así malos olores.

Para evitar tolveneras, se llegó a la conclusión, según los estudios realizados, de que las especies que mejor pueden desarrollarse en éste tipo de suelo son: el Romerito, el Zacaahuistle y el pasto salado, siendo la mejor ésta última ya que tiene una gran tolerancia a las condiciones salino-sódicas del área, y soporta inundaciones y sequías prolongadas.

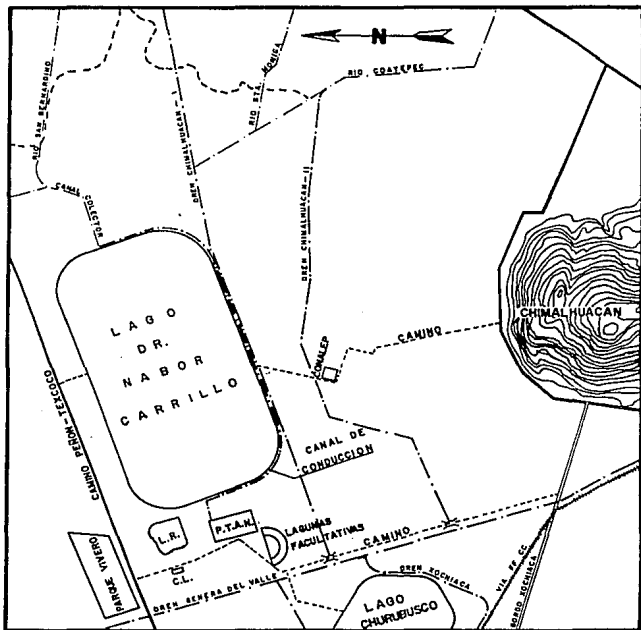
El reuso de aguas residuales reviste una gran importancia por cuanto ofrece una solución al problema, cada día mayor, de escasez de agua de primer uso para satisfacer las crecientes demandas de los diferentes sectores del área metropolitana de la Ciudad de México, y los muy elevados costos que conlleva el suministro desde otras cuencas, sin tener en cuenta las

alteraciones ecológicas que ésta acción motiva.

El área federal del ex-lago de Texcoco tiene las condiciones para constituirse en una gran fábrica de aguas tratadas, pues cuenta con el insumo -las aguas residuales que conducen los ríos Churubusco y de la Compañía y, sobre todo, con la superficie para construir plantas de tratamiento y obras de almacenamiento y regulación que aseguren el buen servicio; además, la circunda un mercado potencial con muy alta demanda de agua no potable para diversos usos.

El estudio de ésta Planta, esta enfocado, a su comportamiento geotécnico, debido a que los hundimientos y deformaciones en la planta al momento de su llenado, fueron considerables, es por ello que se le da un enfoque geotécnico, ya que además de explicar su construcción y funcionamiento, se hace hincapié en sus deformaciones por medio de testigos.

Los temas anteriormente citados, se explican dentro del cuerpo de éste trabajo, que a continuación se presenta; y se llega al final a una conclusión, que también se presenta.



2.- ANTECEDENTES

Desde principios del siglo, el Ex-lago de Texcoco se transformó en una zona desértica, por lo que en los últimos veinte años ha sido objeto de diferentes tipos de desarrollo tendientes a modificar su aridez para solucionar los problemas ambientales que se originan en su interrelación con la Ciudad de México. En la figura 1, se puede observar la ubicación del Ex-lago de Texcoco.

Actualmente una gran extensión ya se encuentra cubierta con pasto que impide la formación de tolvaneras, las cuales creaban problemas sanitarios a la población. Se han construido lagos artificiales para almacenamiento y regulación de aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas residuales, (como es el caso de las Lagunas Facultativas con recirculación, que es el punto que nos interesa en éste trabajo), un módulo experimental de recarga artificial de acuíferos con aguas tratadas, etc., lo cual ha cambiado el panorama de una zona insalubre y conflictiva, a una región recreativa para la Metrópoli. Además se efectúan experimentos sobre obras hidráulicas, sanitarias y agropecuarias, así como la disposición de desechos sólidos generados por una parte de la Ciudad de México, para lo cual se llegó a un convenio por parte del Departamento del Distrito Federal y la Ex-Comisión del Lago de Texcoco, para la utilización de una área para depositar los desechos, y evitar el alto número de enfermedades gastrointestinales.

Tomando en cuenta que la zona es atravesada por el río Churubusco y el río de la Compañía, los cuales se han convertido en emisores de aguas residuales y viendo la carencia de agua existente en la zona, se pensó en el reuso de esas aguas. Los procesos adecuados para producir un agua de buena calidad, tanto para riego, como para recuperación de suelos y creación de lagos recreativos de contacto secundario, son aquellos que involucran costos reducidos y de fácil operación, pasando a un segundo término la extensión de terreno requerida para el tratamiento, lo que hace que el proceso de creación de Lagunas Facultativas sea el idóneo a aplicar. El término "Facultativo" está relacionado con la inclusión del oxígeno del aire dependiendo de su profundidad, ya que pueden actuar para realizar la depuración del agua, tanto bacterias aerobias, como anaerobias y bacterias que tengan la facultad de presentar ambos comportamientos (figura 3). Adicionalmente el agua tratada se recircula para enriquecer el influente de oxígeno disuelto y evitar así los malos olores.

Cabe hacer notar que ésta tecnología de tratamiento se ha aplicado con éxito en Israel, Nueva Zelanda y Sudáfrica, siendo la planta, que a continuación se describe la primera en su tipo que se construye en América.

2.1 .- Situación Geográfica (Localización)

Esta planta de tratamiento, se encuentra ubicada en la zona federal

del Ex-Lago de Texcoco, al noreste de la Cd. de México, vecina al aeropuerto de ésta ciudad, en terrenos de los municipios de Netzahualcóyotl y Chimalhuacán, Estado de México.

Dentro de la zona federal, la planta se encuentra entre el dren Chimalhuacán I, el lago Dr. Nabor Carrillo, la planta de tratamiento de aguas negras por medio de lodos activados, y el Dren general del Valle de México. (Figura 2).

2.2.- Climatología

El registro del clima está realizado en dos estaciones climatológicas denominadas "Campamento Plan Lago de Texcoco" y "Lago Nabor Carrillo", ambas a cargo del Proyecto Lago de Texcoco, de donde se reporta la información sobre precipitación, evaporación y temperatura, durante el periodo de 1972 a 1988.

2.2.1.- Clima

El índice pluviál, evapo-traspiración, la variación estacional de la lluvia efectiva, índice de eficiencia térmica y la concentración de eficiencia en el verano, son parámetros tomados por Thorthwaite para su clasificación del clima, encontrándose que se tiene un clima semiseco, templado, con baja concentración térmica en el verano.

II

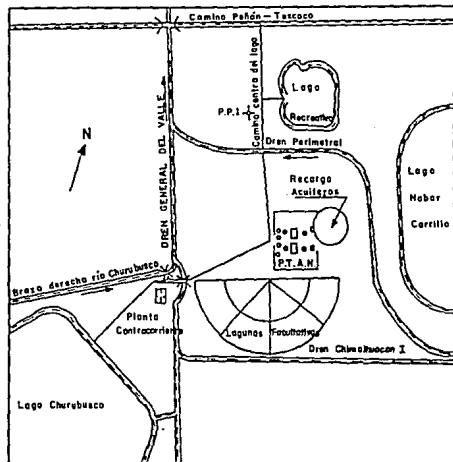
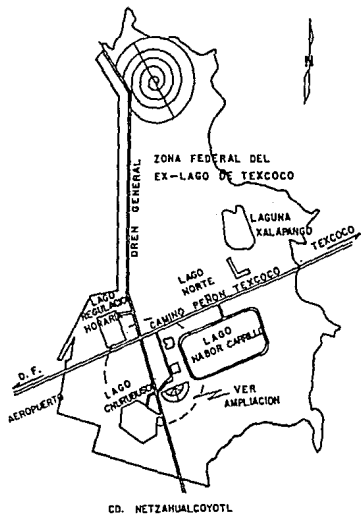


FIGURA 2 LOCALIZACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION

2.3.- Hidrología

2.3.1.- Precipitación

Las lecturas registradas en el pluviómetro se pueden presentar en forma diaria, mensual y/o anual, de la información proporcionada, se desprende lo siguiente: en el año de 1976 se presentó la máxima precipitación anual, la cual alcanzó los 697.3mm, en contraste, el año más seco fué el de 1982, donde se registraron 377mm.

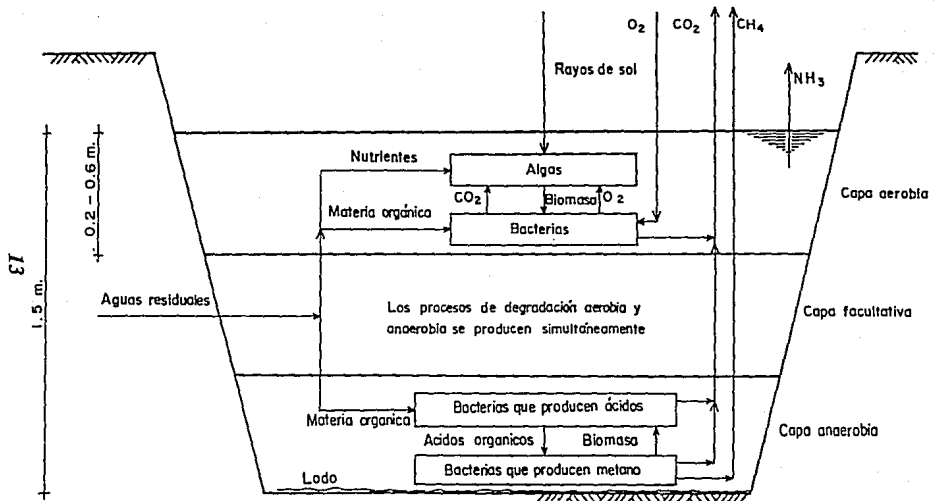
2.3.2.- Evaporación

De la variación de la evaporación en forma mensual y anual, durante el período antes mencionado, se observó que la mayor pérdida se presentó en abril de 1983, alcanzando los 290mm y detectándose que las menores evaporaciones se presentan en los meses de Noviembre a Febrero de cada año. Además, se puede decir que se ha incrementado paulatinamente en los últimos años, alcanzando magnitudes de 2110 y 2279mm/año para los años 1986 y 1987 respectivamente.

2.3.3.- Temperatura

De las temperaturas máxima, mínima y media al abrigo, registradas durante el período mencionado, se puede decir que la temperatura máxima

FIGURA 3



ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA LAGUNA FACULTATIVA

registrada fué de 35°C alcanzada en Mayo de 1983 y la temperatura mínima fué de -7.5°C, la cual se registró en los años de 1976, 1980 y 1986 en los meses de Diciembre a Febrero.

2.3.4.- Viento

Debido a la ubicación geográfica del Ex-lago de Texcoco, éste se localiza en una posición estratégica para el pasaje de los vientos dominantes que inciden sobre la Ciudad de México, pues se encuentra sobre un "corredor" que sopla de Texcoco hacia el Ajusco, en dirección Noroeste-Suroeste (NW-SW); en un 70% del tiempo llegan a ser vientos enrachados con velocidades máximas hasta de 19 m/seg, en los meses de Noviembre a Marzo.

2.4.- Geología

La Cuenca del Valle de México, está situada en el centro de una franja volcánica que atraviesa la república mexicana de Este a Oeste, encontrándose sujeta a grandes esfuerzos tectónicos, así como a erupciones volcánicas ocurridas desde principios del terciario hasta épocas recientes.

Esta cuenca se encuentra dividida en varias subcuencas, de las cuales se mencionarán, entre otras, las de: Teotihuacán, Texcoco, Ciudad de México y Chalco.

La Subcuenca de Texcoco corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres con espesores alrededor de los 60 m; éstas cubren a materiales aluviales del cuaternario y bajo éstos materiales se llegan a encontrar horizontes o capas de roca ígnea característica de la época terciaria.

Las formaciones de terciario medio corresponden a restos de volcanes estratificados, tobas, brechas, derrames y depósitos de lava. Dentro de los tipos de roca podemos encontrar: Andesita, desita basáltica, dacita, etc.

En la época cuaternaria se inició el último ciclo de vulcanismo, cuyas manifestaciones aún persisten. Durante éste período se registró el cierre de la cuenca, lo que trajo como consecuencia el relleno de ésta zona con materiales de acarreo (principalmente ceniza volcánica), transportados por aire y corrientes de agua; hacia las partes bajas, ocasionando la creación de una gran planicie ocupada por lagos de poca profundidad.

Las últimas manifestaciones del vulcanismo fueron las erupciones del Xitle hace 2400 años y Popocatepetl hace 1900 años según los estudios realizados. Por otro lado se estima que el fondo de la cuenca se encuentra a una profundidad comprendida entre los 800 y 1200m.

3.- ASPECTOS IMPORTANTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION (EX-LAGO DE TEXCOCO)

3.1.- Aspecto Sanitario

Se calcula que para el año 2000, el gasto medio de aguas residuales que cruzará el ex-lago de Texcoco, será del orden de 24m³/seg, por lo que resulta evidente considerar el aprovechamiento de los volúmenes no comprometidos en las zonas de riego localizadas aguas abajo de la zona, mediante el tratamiento y reuso de éstas aguas para cubrir las crecientes demandas de aquellas actividades que no requieran agua de calidad potable.

El reuso de aguas residuales reviste una gran importancia por cuanto ofrece una solución al problema cada día mayor, de escasez de agua de primer uso para satisfacer las crecientes demandas de los diferentes sectores del área metropolitana de la Ciudad de México, y los muy elevados costos que conlleva el suministro desde otras cuencas, sin tener en cuenta las alteraciones ecológicas que ésto motiva.

La Ex-Comisión (proyecto) del lago de Texcoco se ha planteado como meta a corto plazo construir y operar las plantas necesarias para obtener el agua tratada que sustituya, en el riego agrícola, hasta 4m³/seg de agua potable, extraída del subsuelo en la zona oriente del ex-lago de Texcoco. De

ésta manera, los pozos ya no operarán y quedará como reserva el agua subterránea para abastecer las demandas de agua potable que se generen en esa zona.

El logro de la meta planteada implica un gran compromiso. La ex-comisión deberá proporcionar un servicio seguro y eficiente en cuanto a la cantidad y a la calidad del agua, y obviamente, al menor costo posible, lo que obliga a la búsqueda de tecnologías de tratamiento que permitan ofrecer tal servicio y, además, sean acordes con los problemas de la zona y con la realidad del país.

Una tecnología que cumple, según se ha constatado, con los requisitos mencionados, son las Lagunas Facultativas con Recirculación, que es la segunda planta de tratamiento que se construyó en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco con una capacidad nominal de 500 lt/seg, en una superficie de 64Has.

Las aguas producidas por ésta planta son ideales para riego, dada la uniformidad de su salida, aunada a los bajos consumos de energía eléctrica, lo que redunda en bajos costos en la operación del sistema comparado con el proceso convencional de Lodos Activados. Estas aguas son ricas en nutrientes debido a las algas producidas en la zona aeróbica, durante el proceso de tratamiento. Además, se ha observado que a diferencia de las aguas negras directas, éstas aguas no "agotan" al suelo al cabo del tiempo.

Las Lagunas Facultativas, como proceso biológico de tratamiento de aguas residuales, presentan las siguientes ventajas: no requieren pretratamiento (solamente de rejillas para evitar así la entrada de sólidos gruesos), no necesita manejo continuo de lodos, su operación es sencilla y el costo de su construcción y operación es reducido. Su efluente es ideal para usos Agrícolas, ya que conserva gran parte de nutrientes necesarios a las plantas, eliminando o transformando en el proceso la mayoría de los elementos nocivos de las aguas residuales. Se adapta principalmente a regiones con disponibilidad de terrenos de bajo costo, por la gran superficie que ocupan.

El término "Facultativo" está relacionado con la inclusión del oxígeno del aire dependiendo de su profundidad, ya que actúan bacterias tanto aerobias, como anaerobias (Facultativas) para realizar la depuración del agua. Adicionalmente el agua tratada se recircula para enriquecer el influente de oxígeno disuelto y evitar así los malos olores.

3.2.- Aspecto Geotécnico

3.2.1.- Estratigrafía

Para conocer la estratigrafía y propiedades mecánicas del sitio se realizaron sondeos por parte del Proyecto Lago de Texcoco y empresas privadas. Estos sondeos fueron del tipo mixto, hasta una profundidad de

40.20m con obtención de muestras inalteradas y alteradas. El muestreo inalterado por tratarse de suelos blandos se llevó acabo mediante el uso de tubo Shelby de pared delgada, de 10cm de diámetro y 80cm de longitud. Por su parte el muestreo alterado se efectuó usando tubo de pared gruesa, correspondiente a la prueba de penetración estándar, de 3.5cm de diámetro interior, 5.08cm de diámetro exterior y 60cm de longitud.

La prueba de penetración estándar consistió en hincar el muestreador metálico de las características ya mencionadas, mediante el golpeo de una masa de acero de 63.5kg, cayendo desde una altura de 76cm.

De acuerdo con éstos sondeos se determinó que en la Subcuenca Texcoco, se presentan tres tipos de subsuelo; Pétreo, caracterizado por las Sierras de Guadalupe, Rio Frío, Santa Catarina, Peñones y Chimalhuacán. Lacustre, el cual corresponde a la parte baja de la subcuenca, con topografía casi horizontal. Transición en donde se presentan dos condiciones; la gradual, en donde los estratos lacustres reducen su espesor y se interdigitan paulatinamente con los materiales aluviales y piroclásticos de las Sierras, y la transición abrupta en donde los rellenos lacustres son interrumpidos horizontalmente por cuerpos volcánicos tal como sucede en Chimalhuacán, los Peñones y parte de la Sierra de Guadalupe.

Las formaciones superficiales del Ex-lago de Texcoco resultan ser semejantes en origen y propiedades a las localizadas bajo la Ciudad de

México, por lo que adoptaron los nombres de éstas, a saber; Formación Superficial (FS), Formación Arcillosa Superior (FAS), Capa Dura (CD), Formación Arcillosa Inferior (FAI) y Depósitos profundos (DP).

Formación Superficial (FS). Constituída por arcillas consolidadas por secado, arenas-limosas y limos-arenosos, con un espesor medio de 1.5m, el cual aumenta hacia la Sierra de Guadalupe a 6m, hacia el centro y sur de la región disminuye su espesor en las zonas en donde hasta hace algunos años eran de inundación permanente. Su contenido de agua promedio es de 61% y se encuentra surcada por innumerables grietas verticales rellenas con limo y arena fina, su profundidad es superior a los 4m y penetran al estrato subyacente. Existen también rellenos sanitarios localizados al centro del vaso con espesor máximo de 6m y de escombros al oriente del Aeropuerto.

Formación Arcillosa Superior (FAS). Tiene un espesor de 17m en el norte y más de 40m al sur; en dirección este-oeste su espesor varía de 17 a 38m. Está conformada por arcillas más deformables intercalada por lentes y estratos arenosos, limo-arenosos y de vidrio volcánico, entre los que destaca un estrato de arena volcánica en estado suelto con espesor de 0.2 a 2m, localizado a una profundidad de 3m en el norte y oriente y se profundiza hacia el sur hasta 12m. Sobre éste se encuentran arcillas con contenidos de agua máximos de 600%.

En la zona norte la FAS tiene un contenido de agua medio de 303% y se encuentra intercalada con estratos limo-arenosos de mayor espesor que los encontrados al centro y sur.

Capa Dura (CD). Esta capa corresponde a un horizonte geológico de desecación, en el cual se depositaron cenizas volcánicas. Tiene espesores de 3.5m al norte y oriente, desapareciendo hacia el sur, lo que proporciona evidencias de la existencia de niveles permanentes de agua durante el relleno de la cuenca. La profundidad de su frontera superior varía de 16m al poniente de el Caracol, hasta cerca de 48m en Chimalhuacán, y de 16m en el oriente, hasta 30m en las inmediaciones de la Sierra de Guadalupe. Este estrato está constituido por materiales limo-arenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por arcilla. Su contenido de agua es de 59% y su resistencia a la penetración estándar (SPT) es muy variable, con valores de 8 hasta más de 50 golpes dentro de una misma zona.

Formación Arcillosa Inferior (FAI). Tiene el mismo origen lacustre que la FAS. Se distingue por su menor contenido de agua, que es de 255%, su mayor resistencia al esfuerzo cortante y menor compresibilidad. En ésta formación se presentan con mayor frecuencia la presencia de estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico, que en la FAS. Su espesor máximo es de 20m al centro del Lago y disminuye hasta desaparecer en la periferia.

Depositos Profundos (DP). También conocidos como segunda capa dura, los cuales están formados por limos, arenas finas y limosas en estado muy compacto; su horizonte superior se encuentra a 24m de profundidad en el oriente y se profundiza hasta 70m en el sur; su contenido de agua promedio es de 50%. Dentro de éstos depósitos se encuentra incluida la Tercera Formación Arcillosa (TFA), localizada a una profundidad de 52m al centro de la región, con espesor máximo de 6m y contenido de agua medio de 147%. Bajo ésta formación se encuentran depósitos aluviales similares a los encontrados en la parte superior, cuyo contenido de agua es de 37% y una mayor cantidad de gravas.

Existe también una Cuarta Formación Arcillosa (CFA), comprendida entre los 150 y 160m de profundidad, la cual no ha sido explorada con los métodos convencionales, pero sí detectada a través de exploraciones geológicas, sondeos para la instalación de piezómetros y para la explotación de pozos profundos.

3.2.2.-Características y Propiedades del suelo

Las arcillas en el Ex-lago de Texcoco presentan contenidos de sales disueltas en el agua intersticial con valores medios de 54000mg/lt en los primeros 60m. Estos contenidos se reducen gradualmente a 1620mg/lt a profundidad de 213 y 1844m, así como al alejarse hacia la periferia en donde la concentración salina queda comprendida entre 232 y 1613mg/lt

para profundidades menores a los 200m.

La concentración máxima de sales en el agua subterránea es de 18% y se reduce al 1% hacia la metrópoli y alrededores de la zona lacustre.

Además al centro y sur del Ex-vaso se ha detectado la presencia de gases, entre los que predomina el metano, el cual se encuentra en suspensión en el agua de los depósitos profundos (Entre la FAI y TFA) y con una presión máxima de 370 KPa.

Para conocer la propiedades (índice y mecánicas) del subsuelo de el Ex-lago de Texcoco, se realizó un sondeo mixto ya descrito en estratigrafía, cuyas muestras obtenidas se les sometió a una serie de pruebas en el laboratorio, tales como:

- 1.- Clasificación visual y al tacto, en condiciones húmeda y secas, según normas del sistema unificado del S.U.C.S.*
- 2.- Contenidos de agua natural (W).*
- 3.- Torcómetro o veleta in-situ (Resistencia al corte).*
- 4.- Obtención de límites de plasticidad, líquido (LL) y plástico (LP).*

- 5.- *Tamizado por la malla 200 para definir los porcentajes de material grueso y fino.*
- 6.- *Compresión no confinada.*
- 7.- *Triaxiales no drenadas no consolidadas.*
- 8.- *Triaxiales consolidadas no drenadas.*

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas y sondeos anteriores, se puede concluir que:

A una profundidad de 0 a 2.4m como máximo, se encontró un relleno, compuesto principalmente por basura revuelta con arcilla limosa oscura en estado semi-compacto (Nº de golpes 2 a 7).

Interiormente y hasta la profundidad máxima explorada, se muestreó una arcilla altamente compresible (CH), muy blanda, con un contenido de agua 250% en promedio para la profundidad de 2.5 a 4.5m y de 300% para el resto de la profundidad explorada (FAS). Su resistencia al corte es muy baja y altamente compresible.

A lo largo del sondeo, y a profundidades de 16.8, 25.8, 30 y 38m, se localizaron lentes intercaladas de: Arena negra, conchitas, vidrio gris claro

y limo arenoso compacto (MH).

a) Propiedades Índice

Por lo que corresponde a las propiedades índice, en la tabla se presentan los valores medios obtenidos para cada formación:

PROPIEDAD FORMACION	CONTENIDO DE AGUA W (%)	LIMITE LIQUIDO VI (%)	LIMITE PLASTICO VP (%)	DENSIDAD DE SOLIDOS Kglm3	RELACION DE VACIOS e	RESISTENCIA AL CORTE Cu (Kpa)
* S	61	99	44	2500	1.7	14.7
FAS	303	301	71	2460	7.3	12.7
CD	59	71	37	2530	1.2	86.3
FAI	255	242	66	2450	5.9	31.4
DPS	49	94	47	2420	1.5	53.0
TFA	147	182	68	2270	3.5	47.1
DPI	37	48	25	----	---	----

* S: Superficial

De acuerdo a la información anterior se puede concluir lo siguiente:

I.- Los valores obtenidos para, el contenido de agua (W) y límite plástico son similares a los registrados en la zona metropolitana al realizar las

correcciones por contenido de agua.

II.- En la zona pétreo los valores medios del límite líquido y densidad de sólidos resultan ser mayor y menor, respectivamente a los registrados en las otras zonas (Lomas y Transición).

III.- Los valores obtenidos para la relación de vacíos son semejantes a los registrados en la Ciudad de México en zonas donde los suelos son poco afectados por bombeo y no existen cargas superficiales.

IV.- Los valores medios de la densidad de sólidos, relación de vacíos y resistencia a la compresión no confinada, para la Capa Dura, Depósitos Profundos, Superiores y Tercera Formación Arcillosa, no son representativos debido al escaso número de muestras obtenidas.

b) Propiedades Mecánicas

Las características de compresibilidad resultan ser más desfavorables que en la Ciudad de México, y se aprecian dos zonas; la virgen y otra en donde las arcillas se encuentran preconsolidadas por bombeo.

Los coeficientes de compresibilidad medios (a_v), en la proximidad de la carga de preconsolidación (σ_p), son de $0.042E-1$ y de $0.016E-1KPa$, para las Formaciones Arcillosas superior e inferior, respectivamente, con

máximos de 0.1E-1KPa los cuales se presentan en la FAS, en las partes afectadas por secado y disminuyen con la profundidad.

La resistencia de las formaciones arcillosas se presentan en la siguiente tabla, resultado de las pruebas de compresión simple no confinada, triaxiales no consolidadas no drenadas (UU) y de veleta in-situ, donde se puede observar que las menores resistencias se presentan a poca profundidad, entre la Capa Superficial y el estrato arenoso de la FAS, con valores medios de 10.8KPa y mínimos de 5KPa.

Por otra parte, la sensibilidad de las arcillas (S_t) varía de 2 a 40, con valor medio de 3.17, lo que representa una disminución en las resistencias del terreno, al estar sometido a una excitación (sismo), con lo que se provoque un remoldeo entre sus partículas.

Además, se ha detectado que después de aumentar la resistencia al esfuerzo cortante por consolidación, al ser aplicadas en la superficie cargas mayores a 49KPa, ésta propiedad puede disminuir un 35% debido a la degradación en la estructura de arcillas. (Murillo y Garcia 1978)

Resistencia al esfuerzo cortante.

<i>FORMACION</i>	<i>Cuq</i>	<i>Cu</i>	<i>Cvmax</i>	<i>Cvr</i>	<i>St</i>
	<i>KPa</i>	<i>KPa</i>	<i>KPa</i>	<i>KPa</i>	<i>-----</i>
<i>FAS</i>	<i>12.7</i>	<i>20.9</i>	<i>21.4</i>	<i>6.3</i>	<i>3.17</i>
<i>FAI</i>	<i>26.5</i>	<i>38.5</i>	<i>51.6</i>	<i>---</i>	<i>----</i>

En las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU) se determinó que el ángulo de fricción interna aparente (ϕ_u); se reduce de 41° a 34° , cuando la velocidad de la deformación cambia de 94 a 0.045%/hora y a largo plazo es de 29° , en términos de esfuerzos efectivos. (Alberro e Hiriart 1973)

En pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD), en compresión y tensión, se determinaron ángulos de fricción interna (ϕ'), con valores de 45° y 50° , respectivamente. (León et al 1974)

c) Propiedades dinámicas

La Cuenca del Valle de México está localizada en la franja volcánica que atraviesa el país de este a oeste; por ésta razón se encuentra sometida a grandes esfuerzos tectónicos y a erupciones volcánicas, desde la época terciaria hasta la fecha, así como a intensos sismos provocados por la

subducción de la placa de Cocos del Océano Pacífico, bajo la placa de Norteamérica.

Los sismos se amplifican en forma notable, por tal motivo las propiedades dinámicas de los suelos lacustres han sido estudiadas ampliamente, sobre todo después de los sismos de 1985.

Este estudio se ha realizado con el método geofísico de la Prospección Sísmica de Refracción, que ayuda a deducir posibles características estratigráficas, partiendo de la interpretación de tiempos de arribo de las ondas refractadas en estratos de características distintas.

El equipo utilizado está integrado por tres partes básicas: el mecanismo generador de onda, conjunto de geófonos captadores y el aparato registrador.

Dentro del equipo generador de ondas tenemos; El martillo o cargas pequeñas de dinamita, y su utilización estará en función de la profundidad a explorar.

De acuerdo con lo anterior tenemos que para profundidades menores a 10m el equipo estará integrado por, un martillo pesado equipado con un microinterruptor en el mango. El martillo al golpear una placa metálica sustentada en la superficie del terreno genera la onda, y simultáneamente

opera el microinterruptor, el cual activa el aparato registrador indicando que da inicio la prueba.

En caso en que la profundidad a explorar sea mayor a 10m, la onda se genera con una explosión, generada por una pequeña carga de dinamita colocada dentro de una perforación de menos de 1m de profundidad.

Los geófonos son dispositivos electromagnéticos que captan las oscilaciones de suelo y las transforman en señales eléctricas. Estos se colocan alineados y a una distancia equidistante entre sí.

El aparato registrador se conoce con el nombre de oscilógrafo, cuyos elementos sensibles (canales) pueden ser de 2 a 12 pequeños galvanómetros, que vibran al recibir la señal de los geófonos. Los galvanómetros llevan adheridos pequeños espejos en los que inciden rayos de una fuente luminosa fija y los reflejan en un papel fotosensible, el cual tiene una escala de tiempo, registrando así el arribo de la onda.

Con los registros obtenidos y las distancias medidas a partir del punto de tiro a los diferentes geófonos, se construye la gráfica distancia-tiempo, de donde se obtendrán los datos necesarios para la determinación de las velocidades.

Una vez conocidas las velocidades y aplicando las siguientes expresiones, basadas en la ley de refracción de ondas en medios elásticos, se determinarán los espesores de cada estrato.

$$H_1 = \frac{do_1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right)}$$

$$H_2 = PH_1 + \frac{do_2}{2} \sqrt{\left(\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2} \right)}$$

Donde:

H_1 y H_2 : Son los espesores de los estratos.

do_1 y do_2 : Son las distancias aparentes al cambio de velocidad.

P : Es el factor de corrección para cálculos aproximados, igual a 0.8.

Nota: El caso anterior es para la presencia de tres estratos y $V_3 > V_2 > V_1$, en el caso donde se tenga mayor número de estratos consultar referencia.

Mediante la aplicación del método antes mencionado se han registrado cuatro "Mantos" sísmicos: el primero corresponde a la Formación Superficial y la Formación Arcillosa superior, con velocidad de propagación de ondas compresionales de 600 a 900m/seg y con espesor al centro del lago

de 30m, el cual disminuye hacia el norte. El segundo manto corresponde a los depósitos lacustres y aluviales, los que constituyen la Formación Arcillosa Inferior, los Depósitos profundos y la Serie Estratificada encontrándose a una profundidad de 30 a 480m, al centro de la región (PPI), con velocidad de 1700m/seg y su espesor disminuye hacia el norte. El tercer manto sísmico está formado por las vulcanitas del oligoceno y mioceno, registrando velocidades de 2200 y 3100m/seg; se encuentra constituido por corrientes lávicas tobas y aglomerados. Se encuentra localizado de 480 a 1450m de profundidad al centro del lago y su espesor se reduce al norte y aumenta al sur. Finalmente el cuarto manto tiene una velocidad mayor de 4500m/seg y aparece a una profundidad de 700m en el norte y a 1450m en la parte central. (SHCP Y NF 1969).

Además de ésta exploración se han realizado ensayos dinámicos de laboratorio en columna resonante, triaxiales cíclicas con consolidación isotrópica y anisótropa, de corte simple cíclico, así como pruebas de campo empleando excitación en el fondo de los sondeos (Down Hole) y de onda suspendida.

De las pruebas antes mencionadas, los intervalos de resultados para el Ex-lago de Texcoco se muestran en las tablas (Jaime 1978).

Propiedades dinámicas

<i>COLUMNA RESONANTE</i>				
<i>SITIO</i>	<i>PROFUNDIDAD</i>	<i>Gmax</i>	<i>D</i>	<i>min</i>
	<i>m</i>	<i>MPa</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<i>CAO</i>	<i>12.7-38.2</i>	<i>2.7-9.7</i>	<i>5.1-10.8</i>	<i>3.2-6.9 10-3</i>
<i>CAF</i>	<i>7.5-20.7</i>	<i>3.5-7.1</i>	<i>9.1-11.4</i>	<i>5.1-8.6 10-3</i>
<i>TRIAXIALES CICLICAS, CONSOLIDACION ISOTROPICA</i>				
<i>CAO</i>	<i>12.6-38.2</i>	<i>1.5-11.2</i>	<i>3.8-19.0</i>	<i>1.8-131 10-2</i>
<i>CAF</i>	<i>7.3-34.6</i>	<i>2.5-11.4</i>	<i>2.0-9.7</i>	<i>3.0-57 10-2</i>
<i>CORTE SIMPLE CICLICO</i>				
<i>CAO</i>	<i>12.3-31.0</i>	<i>0,3-1.2</i>	<i>-----</i>	<i>24-1200 10-2</i>

Velocidad de onda de corte Cs (m/s)
determinada con onda suspendida

<i>ZONA</i>	<i>PRECONSOLIDADA</i>	<i>VIRGEN</i>
<i>FORMACION</i>		
<i>SUPERFICIAL</i>	<i>118</i>	<i>113</i>
<i>FAS</i>	<i>64</i>	<i>54</i>
<i>CP</i>	<i>267</i>	<i>192</i>
<i>FAI</i>	<i>180</i>	<i>134</i>
<i>DP</i>	<i>506</i>	<i>358</i>

Analizando los resultados se puede concluir que; Las arcillas de la Subcuenca del Ex-lago de Texcoco presentan un comportamiento casi elástico, para deformaciones angulares (δ) del orden de $1E-4$ a $1E-1\%$ y su relación de amortiguamiento (D) está entre 2 y 5% para el intervalo de deformaciones antes mencionado. Además, el módulo de cortante (G) depende de: la relación de vacíos, la relación de esfuerzos principales (σ_1/σ_3) y el nivel preconsolidación. Por éstas razones resulta ser mayor en la zona preconsolidada que en la virgen y se degrada en función del número de aplicación de la carga.

Por otra parte, utilizando un modelo unidimensional con propagación de ondas de cortante incidiendo verticalmente, se verifica la influencia de las características geométricas del subsuelo en la respuesta sísmica en campo.

Estudios posteriores han señalado la influencia del índice plástico en el módulo de cortante normalizado (G/G_{max}) y la existencia de una deformación crítica, típicamente del 3%, bajo la cual el comportamiento esfuerzo-deformación cíclico es esencialmente elástico (Rosenbluenth y Ovando, 1991). Además, la resistencia a la falla dinámica no drenada es mayor en 20% a 40% de la resistencia estática no drenada (Romo, 1990).

Es de especial atención la amplificación sísmica que ocurre en está Subcuenca, que medida en términos del espectro de amplitudes de Furier,

puede alcanzar valores de 10 a 50 en la zona lacustre, con respecto a la zona pétrea, y está influenciada por sus condiciones geométricas y por la frecuencia.

Se ha determinado que las ondas en la zona pétrea se amplifican aproximadamente 10 veces, para frecuencias de 0.3 a 3Hz, lo que se atribuye a la presencia de la serie estratificada-Tepozteco, bajo las formaciones rocosas de la Subcuenca (Sing y Ordaz, 1990).

Las mayores ordenadas de espectros de aceleración normalizada ocurren cerca de los dos segundos de período y su magnitud está influenciada por las condiciones de frontera (Se refieren a la existencia de construcciones en las colindancia, el tamaño de estas, etc.), por el índice plástico y la trayectoria de incidencia de las ondas sísmicas (Romo 1990).

Los períodos en los suelos lacustres dependen principalmente del espesor de los estratos arcillosos.

3.3.- Topografía y Propiedades del Subsuelo.

El terreno aunque aparentemente plano, tiene una pendiente hacia el río de la Compañía (poniente); como el proyecto marca las elevaciones en m.s.n.m., el bordo que está más próximo al río de la Compañía, tuvo una mayor altura, disminuyendo gradualmente, de acuerdo con la topografía del

terreno natural. En el mismo sentido las propiedades del suelo mejoran, como se pudo constatar en la etapa de exploración.

Para éste efecto se efectuaron sondeos a cielo abierto hasta una profundidad de 1.50m, obteniéndose muestras cúbicas que fueron ensayadas en el laboratorio, se observó un suelo arcilloso, de alta plasticidad, CH, totalmente virgen y con pesos volumétricos por debajo de los del agua.

4.- PROYECTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCION

Debido a los problemas relacionados con la naturaleza de los suelos de la zona, no es recomendable excavar el terreno para construir las lagunas facultativas con recirculación, sino construir terraplenes con material impermeable. A continuación se presentan las principales cantidades de obra, que inicialmente contenía el diseño del proyecto.

CANTIDADES PRINCIPALES DE OBRA

CONCEPTO:	UNIDAD:	CANTIDAD:
<i>Excavación:</i>	m^3	674
<i>Despalme:</i>	m^2	49000
<i>Compactación y mejoramiento del terreno natural:</i>	m^2	49000
<i>Formación de Bordos (Tepetate):</i>	m^2	52831
<i>Tezontle:</i>	m^3	795
<i>Recubrimiento de grava cementada para rodamiento:</i>	m^3	2825
<i>Concreto Simple:</i>	m^3	1500
<i>Concreto Reforzado:</i>	m^3	3900
<i>Fierro de Refuerzo:</i>	kg	264783

<i>Bombas de capacidad de 250 L.P.S:</i>	<i>pza</i>	<i>3</i>
<i>Tubería de A.C. de 30"φ:</i>	<i>m</i>	<i>280</i>
<i>Compuertas tipo Miller 36"φ:</i>	<i>pza</i>	<i>2</i>
<i>Compuertas tipo Miller 20"φ:</i>	<i>pza</i>	<i>4</i>
<i>Bombas con capacidad de 500 L.P.S:</i>	<i>pza</i>	<i>3</i>

D A T O S D E D I S E Ñ O

Proceso de Tratamiento: Biológico-Lagunas Facultativas, con Recirculación parcial.

<i>Capacidad total nominal:</i>	<i>500 L.P.S</i>
<i>Número de módulos:</i>	<i>2</i>
<i>Capacidad de cada módulo:</i>	<i>250 L.P.S</i>
<i>Funcionamiento de los módulos:</i>	<i>En paralelo</i>

Unidades de cada módulo: Dos lagunas primarias, que operan en paralelo, dos lagunas secundarias y una terciaria respectivamente que operan en serie.

<i>Pérdida por evaporación:</i>	<i>13 %</i>
<i>Caudal del afluente por módulo:</i>	<i>218 L.P.S</i>
<i>Caudal total estimado del afluente:</i>	<i>426 L.P.S</i>
<i>Uso del agua tratada:</i>	<i>Riego Agrícola</i>

Fuente de aguas residuales:

Río Churubusco

Canal de Recirculación: Proporción de 2:1 respecto del agua cruda o sea 500:250 por módulo.

Sopladores para producir:

100 L.P.S a futuro.

4.1.- Criterio de Diseño y Construcción

Para la formación de los bordos de las lagunas, se utilizó "tepetate" debido a que esas tobas son fácilmente disgregables en sus componentes limo-arenosos y posteriormente, con un contenido de agua adecuado son fácilmente compactables y dan como resultado materiales poco permeables, de alta resistencia y poca deformabilidad aunque, comparados con los materiales que forman el suelo local, son demasiado pesados.

Para la protección de los bordos contra el efecto de la erosión por oleaje y viento se proyectó una losa de concreto simple de 7cm de espesor, del lado del paramento mojado. Del lado seco se protegerá exclusivamente con pasto. No se requiere ningún tipo de revestimiento del fondo de las lagunas, ya que el suelo de la zona es prácticamente impermeable.

En cuanto a los asentamientos, totales y diferenciales, es ésta otra preocupación y dificultad inherente a la zona, debido a la mala calidad del

subsuelo. En el caso de ésta obra se hizo trabajar al suelo hasta aproximadamente su valor de preconsolidación, buscando así minimizar los asentamientos esperados, como se verá con más detalle en el inciso dedicado a ese rubro.

Dados los grandes claros que presentaban tanto los canales de distribución del agua, así como las enormes diferencias en peso que descargan las distintas partes de la planta, en especial el cárcamo de bombeo, se previó la presencia de asentamientos diferenciales.

El subsuelo sobre el cual debían ser desplantadas las estructuras es el característico del Ex-Lago de Texcoco, arcillas de alta plasticidad, con muy baja resistencia y una gran compresibilidad por lo cual eran de esperarse problemas de asentamientos en toda la planta y en particular entre las diversas estructuras, con descargas diferentes al subsuelo.

Se decidieron utilizar terraplenes de tierra para conformar las lagunas debido a su flexibilidad de tomar asentamientos diferenciales.

Se recomendó que los canales de concreto se realizaran por paneles de poca longitud, con juntas que soportaran igualmente asentamientos diferenciales.

La estructura más pesada, el cárcamo de bombeo fue analizada por separado previéndose un hundimiento mucho más importante que el resto de las estructuras.

En todos los colados se dejó un recubrimiento mínimo de 7cm para evitar la corrosión de las varillas, dada la alta alcalino-salinidad que caracteriza a los suelos locales. La resistencia, por la misma razón, fue elevada a $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, como mínimo.

En cuanto a pérdidas en el embalse se consideraron 3 principales: la infiltración al subsuelo, dada la gran superficie que se cubre, aunque el material del fondo sea arcilla de baja permeabilidad; la infiltración en el contacto canal-suelo y bordo-suelo, donde a largo plazo se espera se establezca una red de flujo; sin embargo, las dos pérdidas anteriores son insignificantes en comparación con las pérdidas por evaporación, dadas, la gran superficie expuesta y la alta incidencia de radiación solar, que alcanza evaporaciones de 150mm/mes en promedio.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales de temperatura, evaporación, precipitación, así como las condiciones alcalino-sódicas de los suelos y la experiencia adquirida en construcción en ésta zona a través de casi 15 años se ha observado que al aumentar el consumo de concreto las obras resultan más impermeables, aunque con ello, de manera indirecta, los concretos se vuelven de mayor resistencia. Se ha ensayado y observado

del laboratorio, que lo más conveniente par una permeabilidad casi perfecta eran resistencias de $f'c=350\text{kg/cm}^2$, sin embargo, por razones de economía, cuando es posible se disminuye a $f'c=300\text{kg/cm}^2$.

La permeabilidad buscada con el aumento de consumo de cemento no es tan solo por tratarse de obras hidráulicas, la mayoría que aquí se construyen, sino sobre todo por la elevada presencia del nivel freático de las aguas alcalino-sódicas ya mencionadas, las cuales reaccionan con los agregados disminuyendo la resistencia y aún, desintegrando los concretos. Una de las manifestaciones más comunes de esa desintegración es la llamada "piel de cocodrilo" y el inicio de asperezas en la superficie, originalmente aplanada.

El uso de aditivos y curados cuidadosos en las obras han permitido un buen comportamiento de los concretos construidos con cemento normal (tipo I), utilizando cemento tipo II y V en casos especiales.

En cuanto al uso del acero, debido al mismo ambiente agresivo ya descrito, éste sufre de corrosión acelerada, por lo que se ha optado por dejar como norma un recubrimiento mínimo de 7cm, lo que redunda en aumento en el peso de las estructuras, pero alarga la vida útil de las estructuras.

Los diámetros mínimos de acero se han buscado que sean mayores a 3/8 de pulgada en elementos estructurales en contacto con el suelo o aguas residuales, sin embargo, en varias obras resulta incosteable el colocar acero mayor que ese diámetro, ya que son elementos muy poco solicitados y su costo se aumenta desproporcionalmente.

Respecto a los materiales pétreos para agregados en los concretos, se han buscado bancos de materiales (arena y grava) los cuales sean lo menos reactivos al álcali y a las sales. Estos bancos ya se tienen localizados y se les recomienda a los constructores de la zona utilizarlos.

4.2.- Descripción de la Planta de Tratamiento (L.F.R.)

La planta de tratamiento tiene forma de un semi-círculo y es de una capacidad nominal de 500lt/seg, dividida en dos módulos iguales de 250lt/seg cada uno, los cuales funcionan en paralelo y son independientes entre sí. La planta se alimenta de las aguas residuales provenientes del río Churubusco, aprovechando la misma obra de toma que se construyó para abastecer la planta existente de lodos activados, habiéndose realizado únicamente la derivación hacia las Lagunas Facultativas.

Se consideró una profundidad de agua en las lagunas de 1.5m, agregándose un metro de bordo libre, tomando en cuenta el oleaje máximo que pueden producir los vientos de la zona.

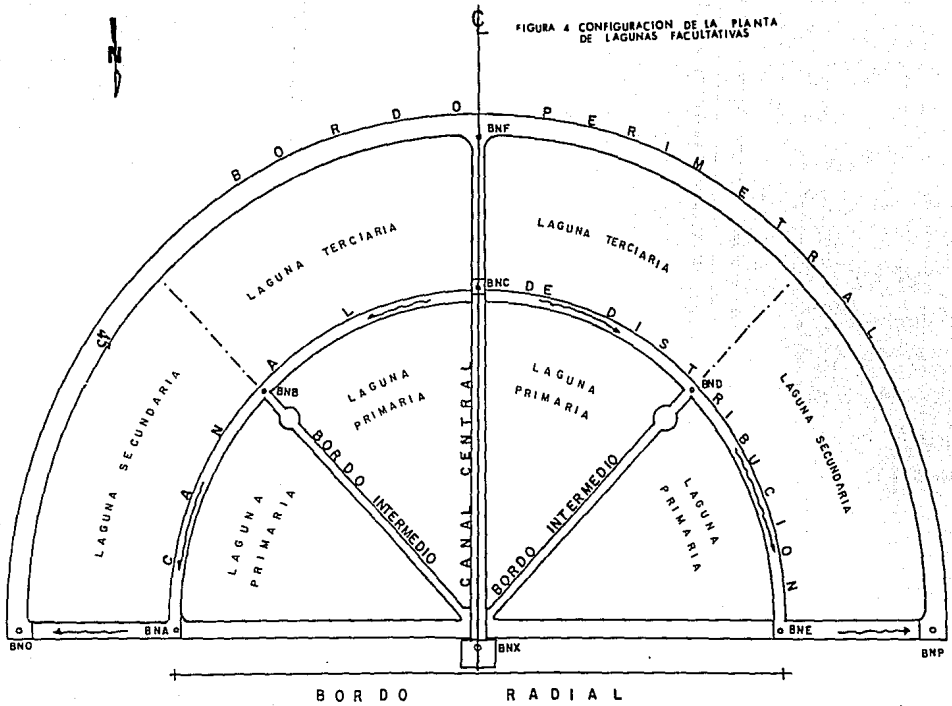
Cada módulo consta de dos lagunas primarias de 6.3Ha de superficie, con un tiempo de retención de 9 días cada una, las cuales operan en paralelo, seguidas de una laguna secundaria y otra terciaria operadas en serie que ocupan el sector externo del semi-círculo (como se muestra en la figura 4) con una superficie de 10.3Ha y un tiempo de retención de 7 días por laguna.

El diseño operativo de la planta considera que parte del agua tratada se recircule, mezclándola con el agua cruda para enriquecerla de oxígeno y hacer más rápido y eficiente el proceso, pasando posteriormente a las lagunas primarias; por efectos de tirante pasa a las lagunas secundarias y es recolectada por un canal central que las conduce hacia los cárcamos de recirculación y las aguas tratadas para reiniciar el proceso.

4.3.- Cálculo de la Cimentación del Cárcamo de Bombeo

El programa de construcción marcaba como primera etapa la realización del Cárcamo de Bombeo, con el objeto de que los asentamientos se desarrollaran mientras se construía el resto de la planta, sin embargo, se construyó el Cárcamo al final de la obra, cambiando el programa. Durante el llenado, presentó un asentamiento súbito, no registrado completamente, debido a la falta de nivelaciones. Estando el Cárcamo vacío no presentó ningún problema.

FIGURA 4 CONFIGURACION DE LA PLANTA DE LAGUNAS FACULTATIVAS



En base a la necesidad de funcionamiento hidráulico y de diseño estructural, se pensó en utilizar una cimentación tipo cajón, totalmente compensada, sin embargo, no se realizaron sondeos ni se efectuaron estudios de Mecánica de Suelos necesarios para la construcción de la planta; esto conllevó a que la cimentación no resultara compensada, ya que se excavó a una profundidad menor que la necesaria para la compensación total.

En el estudio "a-posteriori", y en base a las curvas de compresibilidad obtenidas, se determinaron asentamientos del orden de los 38cm, midiéndose en la realidad con nivelaciones topográficas, más de 39.91cm a la fecha, luego de construida la estructura.

En general no hubo problemas en la construcción de ésta planta. Los bordos fueron construidos con tobas alteradas (tepetate limo-arenoso) dada su facilidad de compactación.

La ejecución de los canales, del cárcamo de bombeo y de otras obras complementarias, incluyendo a la sub-estación eléctrica, no presentaron problemas constructivos.

El proyecto original de la planta recomendaba terraplenes con un ancho de corona de 4m y taludes 2:1 ($\beta=27$). A la altura requerida de los terraplenes se le agregaron 50cm de altura, debido al hundimiento de los

terraplenes durante la construcción. Los taludes húmedos de los terraplenes se protegerán con concreto y los taludes secos se recubrirán con pasto.

5.- PROCESO DE TRATAMIENTO

En cuanto al proceso de tratamiento, las Lagunas Facultativas pueden considerarse como un término medio entre lagunas aerobias y lagunas anaerobias., La sección vertical de una Laguna Facultativa se puede dividir en tres capas principales: aerobia, facultativa y anaerobia. En cada una de éstas capas, se producen procesos diferentes, pero existe un equilibrio delicado entre las tres capas.(Fig.3)

La capa superficial o aerobia es rica en oxígeno y algas. La profundidad de ésta capa depende de las condiciones climáticas, pero varía generalmente de 0.2 a 0.6 m. El oxígeno se obtiene de la atmósfera por aereación de la capa superficial y de las algas que lo producen por un proceso fotosintético, utilizando la energía solar. La disponibilidad del oxígeno en ésta capa depende de varios factores, tales como: turbulencias causadas por vientos, temperatura del agua, grado de insolación y tasa de consumo de oxígeno por microorganismos.

Los productos finales de la actividad aerobia que tienen lugar en la capa superficial son: bióxido de carbono y agua. El proceso biológico es activado por dos tipos de organismos: algas y bacterias. Las algas asimilan nutrientes y bióxido de carbono y liberan oxígeno. Las bacterias consumen oxígeno, materia orgánica y biomasa (de bacterias y algas) y liberan bióxido de carbono.

Cuando no hay sol (durante la noche o en días nublados), las algas se comportan como bacterias, o sea consumen oxígeno y entonces la concentración de oxígeno puede bajar hasta cero. Como la presencia de las algas es imprescindible para el desarrollo del proceso aerobio, las aguas residuales no deben contener sustancias tóxicas en concentraciones que pueden impedir el desarrollo de las algas. La presencia de algas en la capa superior de la laguna provoca un alza de PH y consecuentemente se crea un proceso de eliminación de amoníaco.

En la capa de fondo de las lagunas no hay oxígeno y ocurren procesos anaeróbicos. El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica se produce en dos fases:

a) Las bacterias generadoras de ácido descomponen la materia orgánica disuelta, produciendo varios ácidos orgánicos.

b) Las bacterias generadoras de metano descomponen los ácidos orgánicos, produciendo metano, bióxido de carbono y agua.

Como las bacterias que producen metano son sensibles al exceso de ácidos y volátiles, debe conservarse un equilibrio entre la producción y la descomposición de los ácidos. Para que el proceso anaeróbico se desarrolle en forma adecuada, se requiere también una proporción justa entre la alcalinidad y la concentración de ácidos volátiles.

En la capa facultativa intermedia se producen simultáneamente procesos anaeróbicos y aeróbicos. No es posible determinar con exactitud, el límite entre la capa facultativa y la capa anaeróbica.

La planta, para efectuar el tratamiento, está dividida en lagunas: primarias, secundarias y terciarias. (figura 4).

El agua negra, adicionada con agua ya tratada a nivel secundario proveniente del afluente de la misma planta, pasa a las lagunas primarias, donde se sedimenta y se producen los procesos aeróbicos y anaeróbicos ya descritos, predominando sobre todo éste último, debido a la gran cantidad de materia orgánica en suspensión y al alto grado de turbiedad del agua.

Al pasar a las lagunas terciarias, son los procesos aeróbicos, generados por algas sobre todo del tipo Euglena, los que predominan ampliamente reduciéndose a un mínimo aquellos del tipo aeróbico al ampliarse la zona facultativa y penetran más profundamente los rayos solares al reducirse la turbiedad del agua.

El agua ya tratada es enviada hacia un canal colector (fig.2) y de ahí se destina una parte a reiniciar el proceso de tratamiento, mezclándola con el agua cruda del influente y el resto hacia su reuso a través del afluente.

5.1.- Uso de Aguas Residuales Tratadas en Riego Agrícola

Los riesgos a la salud que representa el riego con agua residual tratada son proporcionales al grado de contacto humano con el agua y a lo apropiado y confiable del tratamiento.

La aplicación al suelo de aguas residuales municipales es una práctica común en las regiones áridas y semiáridas del mundo. Hay regiones donde el 70 a 85% del agua residual es usada en riego agrícola y en el riego de áreas verdes. En los Estados Unidos, conforme aumentan las demandas de agua, el riego con aguas residuales tratadas se vuelve un componente lógico e importante en la planeación y desarrollo de recursos hidráulicos.

En el estado de California cerca de 270 millones de metros cúbicos de agua residual municipal de 240 ciudades y poblados son reusadas cada año, especialmente en la agricultura y en el riego de áreas verdes. Adicionalmente, cerca de 753 millones de metros cúbicos son reusados después de ser descargados a cuerpos de agua superficiales o subterráneas. Más de la mitad del agua reusada directamente en la agricultura (57%) se emplea en el riego de forrajes, fibras y semillas, uso que no requiere un alto nivel de tratamiento de las aguas. Un 7% se usa en el riego de huertas, viñedos y similares. Un porcentaje creciente, actualmente 14%, se usa en el riego de campos de golf y áreas verdes.

El creciente uso de aguas residuales municipales tratadas tiene, entre otras, las siguientes causas:

- 1.- La falta de agua de primer uso a un costo competitivo.*
- 2.- El aprovechamiento de los nutrientes presentes en las aguas residuales.*
- 3.- La disponibilidad de afluentes de buena calidad.*
- 4.- La necesidad de adoptar programas de planeación de recursos que incluyan la conservación y reuso del agua.*
- 5.- Los cada vez más estrictos requisitos de calidad de descargas de agua residual, incluyendo sus tratamientos para evitar la contaminación.*

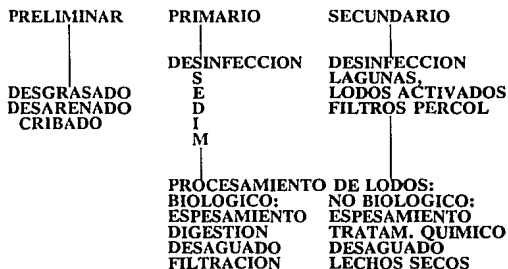
Si bien la aplicación del agua residual en los suelos es en sí una forma de tratamiento, otros tratamientos son necesarios antes de que el agua residual pueda ser usada en la agricultura o en el riego de áreas verdes. El tratamiento previo al reuso es necesario para proteger la salud pública, prevenir condiciones insalubres durante la aplicación y almacenamiento del agua y para evitar daños a los cultivos, a los suelos y a los acuíferos. El nivel de tratamiento es un factor importante en la planeación, diseño y administración del sistema de irrigación.

5.2.- Calidad del Agua Reusada

La calidad del agua tratada depende en gran medida de la calidad

original del agua, el tipo de contaminantes añadidos durante el uso y el nivel de tratamiento que recibe el agua residual (como se muestra en el esquema).

ESQUEMA DE INTEGRACION DE PROCESOS



PROCESO AVANZADO:

- a).- Desinfección.
- b).- Remoción de Nitrógeno
 - Nitrificación-Desnitrificación
 - Intercambio Ionico Selectivo
 - Cloración a punto de Quiebre
 - Desorción de Gases
 - Disposición en el Suelo.
- c).- Remoción de Fósforo
 - Precipitación Química.
- d).- Remoción de Sólidos Suspendidos
 - Coagulación-Filtración-Clarificación.

- e).- Remoción de Orgánicos y Metales Pesados
Adsorción en Carbón Act.
- f).- Remoción de Sólidos Disueltos
Osmosis Inversa
Electrodialisis
Destilación.

Los datos de calidad normalmente reportados en plantas de tratamiento son generalmente los relativos a la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos suspendidos, parámetros de interés en el control de la contaminación; en cambio, los parámetros de mayor interés para irrigación, como contenido de sales y de elementos químicos específicos que afectan el crecimiento de las plantas o la permeabilidad de los suelos, no son normalmente medidos. Por tal razón es a menudo necesario muestrear y analizar las aguas residuales para conocer la concentración de éstos contaminantes para determinar su adecuabilidad para riego agrícola y riego de áreas verdes.

5.3.- Evaluación de la Calidad del Agua

Históricamente, la calidad del agua para riego agrícola ha sido determinada por la cantidad y tipo de sales presentes en el agua. Conforme aumenta la salinidad del agua, aumenta la probabilidad de daños a suelos, agua y cultivos. Los problemas potenciales están relacionados con el contenido total de sales, el tipo de sales y las concentraciones excesivas de

uno o más elementos. Estos problemas no son diferentes de los causados por la presencia de salinidad o de iones específicos en aguas frescas empleadas en riego agrícola y son de interés sólo si restringen el uso potencial del agua o si requiere de técnicas especiales en su manejo para permitir crecimientos y rendimientos aceptables de los cultivos. La adecuabilidad de un agua tratada para riego agrícola se estima en función del manejo que se necesite para controlar los problemas que la calidad de la misma pueda ocasionar.

a).- Salinidad

La salinidad medida como conductividad eléctrica es el factor más importante en la determinación de la aplicabilidad de un agua para riego. Las afectaciones a los cultivos por el agua de riego están generalmente ligadas al aumento de la salinidad del agua. La única forma práctica de manejar el problema de salinidad es estableciendo un régimen neto de flujo descendente de agua y sal a través de la zona radicular. Bajo éstas condiciones es esencial una buena drenabilidad del suelo para permitir un movimiento continuo de agua y sal abajo de la zona radicular. El uso prolongado de agua residual tratada para riego, no es posible sin el adecuado drenaje de los suelos.

b).- Toxicidad de Iones Específicos

La toxicidad por iones específicos se presentan cuando éstos son acumulados por el cultivo en cantidades tales que resultan dañinas al cultivo y/o disminuyen el rendimiento. En éste sentido los iones más peligrosos en las aguas residuales son sodio, cloruros y boro. La toxicidad más común producida por el uso de aguas residuales municipales es la provocada por el boro proveniente de las descargas de detergentes domésticos o de plantas industriales. El uso doméstico tiende también a incrementar las concentraciones de los cloruros y el sodio, especialmente donde se emplean ablandadores de agua. En el caso de cultivos sensibles, es difícil corregir la toxicidad de las aguas, lo que obliga frecuentemente a cambiar el tipo de cultivo o la fuente de agua. Este problema se agrava en climas secos y calientes.

c).- Permeabilidad de los Suelos

Aparte de su efecto directo sobre los cultivos, el sodio en las aguas de riego afecta la estructura del suelo, reduciendo la tasa de infiltración, así como la capacidad de reaeración del suelo. Si la tasa de infiltración disminuye sustancialmente, puede llegar a ser imposible suministrar a la planta el agua suficiente para su crecimiento. Además, los sistemas de riego con agua residual están ubicados frecuentemente en suelos pobres o en suelos con problemas de permeabilidad. En éstos casos puede ser necesario

modificar el perfil del suelo excavando y reacomodando el terreno en las áreas de riego.

Los problemas de permeabilidad se presentan normalmente en las capas superficiales del suelo y se deben a un alto contenido de sodio o un alto contenido de calcio. La tasa de infiltración del agua en el suelo es función de la salinidad y de la relación de absorción de sodio (RAS), por consiguiente éstos dos parámetros deben ser analizados conjuntamente para evaluar el problema potencial de permeabilidad. (cuadro 2).

Las aguas residuales municipales presentan normalmente altas concentraciones de sales y de calcio, razón por la cual es poco probable que laven o lixivien el calcio presente en el suelo. Sin embargo, éstas altas concentraciones dan como resultado un alto índice de RAS, lo que debe ser tomado en cuenta en la planeación de proyectos de riego como agua residual tratada.

d).- Nutrientes

Los nutrientes presentes en las aguas residuales municipales le confieren un valor fertilizante pero, en ciertos casos, se pueden exceder los requerimientos de las plantas y provocar crecimientos excesivos, maduraciones extemporáneas o una deficiente calidad del producto. Los nutrientes que normalmente se presentan en cantidades significativas son

nitrógeno y fósforo y, a veces potasio, zinc, boro y azufre.

El nutriente más benéfico de las aguas residuales y que con mayor frecuencia se pueden presentar en exceso es el nitrógeno. El agua residual tratada típica contiene aproximadamente 33mg/lt de nitrógeno total. La mayor parte de éste nitrógeno se encuentra en forma de ión $N-NH_4$ o como nitrógeno orgánico fácilmente asimilable, y escasamente en forma de nitrato. El valor económico real del nitrógeno depende de la lámina de agua aplicada, de los requerimientos del cultivo y de otros factores. En muchos casos el agua tratada suministra el requerimiento total de nitrógeno de los cultivos, así como los requerimientos de otros varios elementos.

e).- Problemas Varios

Algunos problemas de obturación en sistemas de riego de aspersión y de goteo han sido reportados como consecuencia del uso de aguas residuales. Crecimientos de bacterias, lamas y/o algas o sólidos en suspensión pueden causar obstrucciones al flujo del agua en las cabezas de los aspersores, en los orificios o en las líneas de suministro. Los problemas más frecuentes de taponamientos se presentan en los sistemas de riego por goteo desde el punto de vista de salud pública; sin embargo, éstos sistemas se consideran ideales por ser totalmente cerrados y reducir así los riesgos a la salud de los trabajadores que pueden presentar la dispersión del rocío en los sistemas de riego por aspersión.

Las concentraciones excesivas de cloro residual en las aguas pueden causar daño al follaje de las plantas cuando se emplean riesgos por aspersión. Concentraciones de cloro residual por debajo de un miligramo por litro no afectan al follaje, pero cuando la concentración exceda de 5mg/lt se pueden presentar daños graves.

Los contaminantes en las aguas residuales que son de interés sanitario pueden ser clasificados en químicos y biológicos. Para la mayor parte de los usos de agua tratada los principales problemas de salud pública se deben a la presencia de organismos patógenos. Bacterias patógenas, helmintos, protozoarios y virus son removidos en distinta proporción en los diversos procesos de tratamiento. El proceso de tratamiento más eficiente para la destrucción de patógenos es la desinfección con cloro. La inactivación de virus con cloro es, sin embargo, muy variable.

Para proteger la salud pública la reglamentación correspondiente debe incluir no sólo normas de la calidad del agua, sino también normas de diseño y operación de procesos de tratamiento y de muestreo y monitoreo del agua. Para minimizar los riesgos a la salud pública, y atendiendo también a problemas estéticos, se deben de fijar estrictos controles en la distribución y uso del agua después de que sale de la planta. Las reglamentaciones para usos específicos de riego deben tomar en cuenta el nivel de contacto con los trabajadores y el uso de los cultivos.

6.- COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA

Al momento del llenado se observaron los primeros problemas en la obra:

Se presentó un flujo de agua bajo el bordo perimetral, el bordo radial y el canal de distribución, en la parte radial (fig.5).

Las fugas del bordo perimetral se presentaron sobre todo a continuación del bordo radial en los tramos oriente y poniente; éstas fugas fueron sobre todo por debajo del contacto suelo-bordo y suelo-estructura, así como en algunos tramos en donde existían juntas constructivas; eran localizadas, puntuales, pero se presentaron en número de 153. Además se detectó el hundimiento de la esquina poniente, del cárcamo de bombeo de aguas tratadas y la flotación del canal central.

A las fugas en la parte interior del canal de distribución no se le atribuyó importancia, puesto que éstas se compensarían hidráulicamente al cubrirse completamente los estanques de agua.

Con objeto de frenar las fugas perimetrales, se propuso como solución la colocación de bentonita en la parte interna del bordo, con un enrocamiento de 50cm de espesor (fig.6), complementada con el canal colector de agua filtrada, para llevarla a pozos de filtración, tipo indio. La

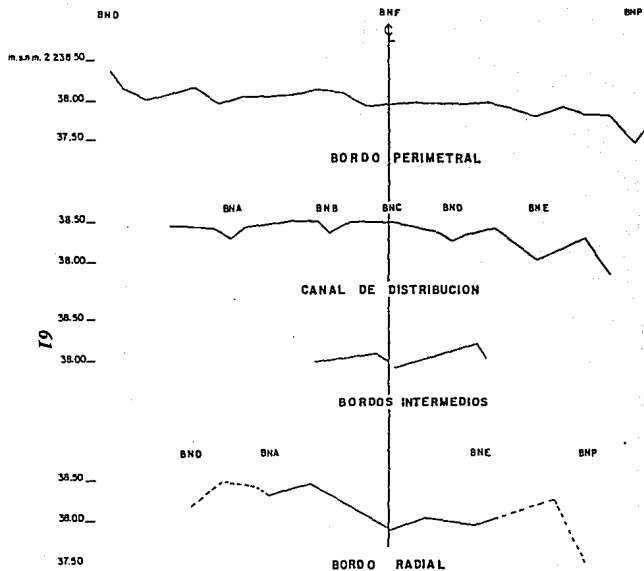


FIGURA 5 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN LOS COMPONENTES DE LAS L.F. 1988 OCT.

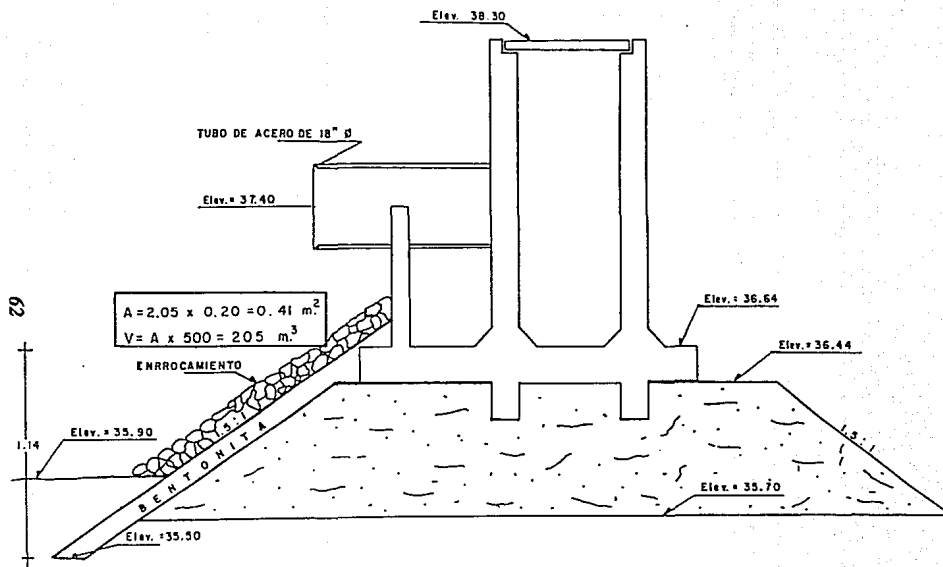


FIGURA 6 FRENO A FUGAS PERIMETRALES CON BENTONITA

solución realizada fue construir una berma exterior de 220m de largo, 0.75m de altura en promedio y 6m de ancho; el material utilizado para dicha berma fue la arcilla local, bandeada con tractor D-6. Esto se construyó en ambos lados, oriente y poniente, sin embargo, el canal colector de agua filtrada, solo se construyó en el lado poniente. A la fecha ésta solución, ha funcionado de manera adecuada.

En la parte interior las soluciones realizadas fueron diferentes. En el costado oriente y dado que existió un tirante de agua promedio de $h=60$ cm, se colocó bentonita a volteo en las zonas de fugas localizadas; para disminuir el gasto de estas fugas se colocó costalera del mismo material bentonítico también a volteo. El efecto fue a mediano plazo en un período de 15 a 25 días, la bentonita arrastrada por el agua hacia las fugas selló su propio camino, taponeándose las salidas. En la zona interior poniente, que se encontraba seca, se procedió a colocar costalera apoyada sobre una berma de arcilla local; esta berma tuvo un ancho de un metro y fue rematada con una hilera de costales, colocados de uno en uno a todo lo largo del muro.

La segunda parte de la compostura consistió en una berma más ancha, de 4m, que solo alcanzó a cubrir la mitad poniente de dicho muro. Lo anterior debido a la presencia del agua que comenzaba a inundar la laguna. La solución al igual que la anterior, funcionó adecuadamente; al ser arrastrada la bentonita, taponeó su propio camino. (Fig. 7)

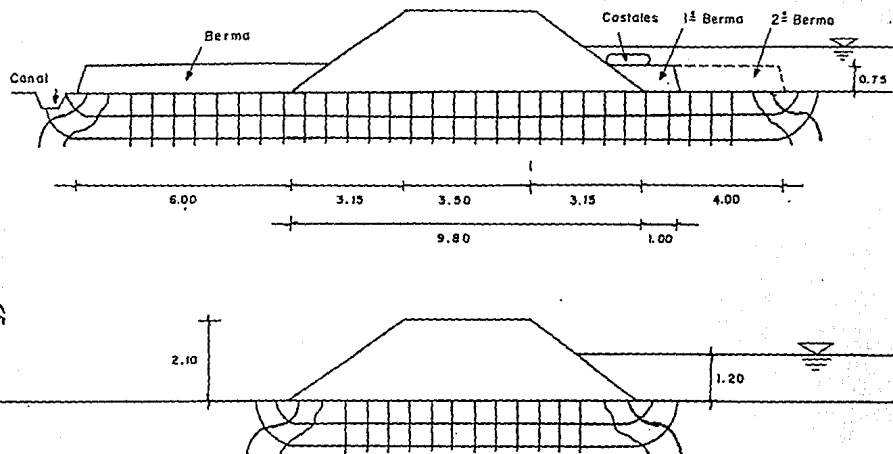
El objeto de las bermas interior y exterior, fue el desarrollar una red de flujo más larga, que permitiese abatir el gradiente hidráulico que se generó con la creación del tirante de agua. Se considera que con la presencia de las bermas seguirán existiendo las fugas por debajo del contacto suelo-estructura, pero la salida del agua será menos dañina por tener menor velocidad de arrastre, además de ser captada por el canal colector que se colocó al lado de la berma, y de ahí procederá a ser infiltrada, evitando así la creación de encharcamientos periféricos.

Además de lo anterior, en los muros de concreto y en las juntas de dichos muros se observaron fugas. Aquellas a través del concreto no se tocaron y dada la presencia de sales y materia orgánica disueltas en el agua, esas mismas se encargaron de taponarla. figuras 6 y 7

Para sellar las fugas en las juntas, se aplicaron diferentes métodos pero el que mejor funcionó fue el demoler el concreto hasta llegar al refuerzo y colocar nuevamente, colocando un sellador hidráulico en las juntas.

6.1.- Asentamientos de la Estructura

El proyecto contemplaba tres diferentes tipos de estructura; una pesada con carga concentrada, de concreto, que era el Cárcamo de Bombeo; otra una estructura térrea de 2.10m de altura, con una base de



65

FIGURA 7 UTILIZACION DE BERMAS PARA EVITAR FUGAS

2.80m, y una corona de 3.50m, que eran los bordos radial, intermedio y perimetral; la tercera eran cajones de concreto, que formaron los canales de distribución y central.

Los bordos transmiten una carga lineal de 23.73ton/m, mientras que los canales transmiten 1.75ton/m vacíos y 2.96ton/m llenos.

La diferencia de descargas al subsuelo, en sus diferentes fases: vacío, llenado y lleno, transmiten cargas muy diferentes que por ende generan asentamientos muy diferentes, considerando siempre el mismo tipo de suelo.

Los asentamientos diferenciales comenzaron a observarse desde la etapa de construcción en que bordos de tierra comenzaron a sufrir un asentamiento y los canales de concreto permanecieron fijos, creándose asentamientos diferenciales en sus contactos (BNA, BNB, BND, BNE, BNF, BNO, BNP, BNX), como se observa en las nivelaciones que se presentan en la figura 5.

Al momento del llenado se presentaron nuevos problemas y nuevos asentamientos. El cárcamo de bombeo se asentó a gran velocidad presentando un asentamiento súbito.

Este asentamiento brusco del cárcamo originó problemas en todo su entorno, sobre todo en el canal central, que además presentó una flotación

de la cual se hablará más adelante.

El estudio de mecánica de suelos para éste cárcamo señaló como cimentación adecuada una del tipo parcialmente compensada, a la cual se le previeron asentamientos de 38cm, aunque no del tipo "colapso", como presentó en la realidad.

Nivelaciones actuales indican un hundimiento de 39.91cm, a la fecha, un año después de construida la estructura. La evolución de éstos asentamientos, luego del primer año, se ha vuelto constante y estable, por lo cual se considera que la casi totalidad, el 90% se haya presentado de manera instantánea durante la etapa de llenado, ya que mientras estuvo vacía la estructura se comportó adecuadamente. Cabe resaltar que mientras estuvo el cárcamo vacío no presentó problemas de asentamientos.

Los bordos intermedios y radial también sufrieron asentamientos, aunque menores, tanto por los suyos propios, como por el hecho de ser estructuras flexibles y poderse adaptar a los asentamientos del terreno, siguiéndolo.

En la esquina poniente, como ya se mencionó, se tenía una cota más baja que el resto del terreno por lo cual la altura de los bordos debió ser mayor que el resto y por ende las descargas al subsuelo fueron mayores. Esto originó fuertes asentamientos en el lugar, como ya fue descrito.

Posteriormente, con objeto de poder igualar los niveles de embalse dentro de la laguna, sin derramarse por ese lado, se elevó el bordo poniente 60cm, generándose nuevos asentamientos que originaron que el canal de distribución, vecino al bordo poniente quedará ahogado en sus tubos de salida.

Igualmente se generaron nuevas fisuras en los muros de concreto y para evitar fugas se dejaron fuera de servicio dos paneles, sin embargo, esto no ha modificado la operación de la planta.

Se tienen algunos de los resultados de las observaciones realizadas durante el periodo de Marzo de 1988 a Mayo de 1989, por medio de nivelaciones en testigos superficiales, que se encuentran en las estructuras de la planta denominada Lagunas Facultativas con Recirculación.(Fig. 8)

La prueba de llenado de las Lagunas, se realizó el 29 de Febrero de 1988, y la lectura inicial en testigos superficiales, se tomo el 11 de Marzo del mismo año.

Para ello, se anexan gráficas en las que se puede apreciar el comportamiento de cada una de las estructuras que componen la obra antes citada, así como la planta de localización de la misma(Fig. 9).

LOCALIZACION DE TESTIGOS SUPERFICIALES
 EN LAS ESTRUCTURAS DE CONTROL
 DE LAS LAGUNAS FACULTATIVAS
 CON RECIRCULACION

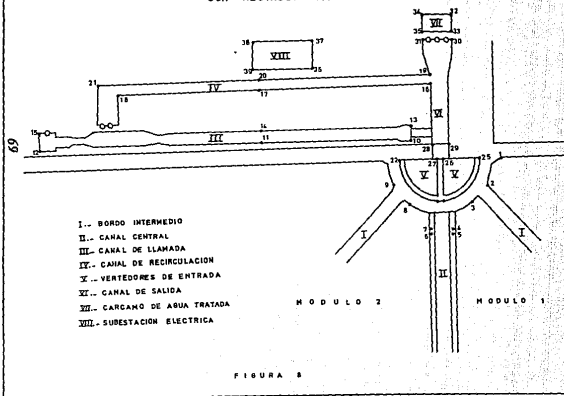


FIGURA 8

6.2.- Bordo Perimetral

Esta estructura, construída con tepetate semicompactado, tiene forma trapecial, con una base de 9.80m, corona de 3.50m, altura promedio de 2.10m y taludes con pendiente de 1:1.5 (Fig.9).

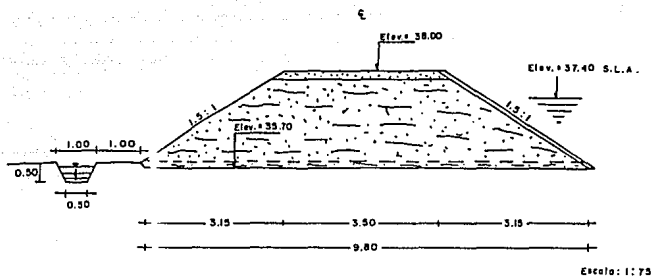
El Bordo Perimetral, encierra la parte circular externa de la planta (Fig.4), iniciando en la esquina poniente y termina en el extremo oriente de las Lagunas; en planta tiene forma de un semicírculo con una longitud de 2042m.

La estructura presenta un comportamiento irregular con hufamiento en toda su longitud, a excepción del testigo 1, en el extremo poniente, como se puede observar en la gráfica 1, testigos 2 a 7, siendo el máximo a la fecha de 7.3cm registrado en el testigo 6 con una velocidad promedio de movimiento de 0.66cm/mes.

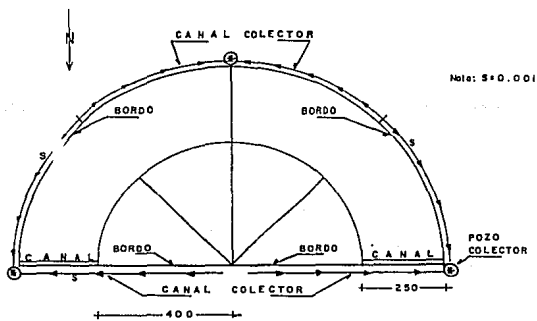
En ésta gráfica, también se puede observar que en el testigo No.1 se presentaron asentamientos de 13.00cm, debido aparentemente al exceso de carga que tiene en esa zona.

6.3.- Bordo Radial

La estructura forma una línea recta que une los extremos del Canal



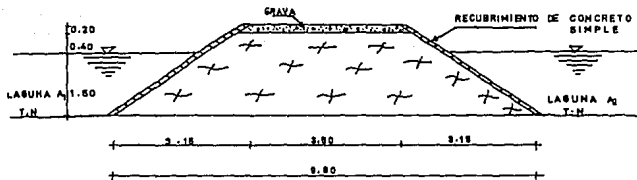
BORDO LAGUNA FACULTATIVA



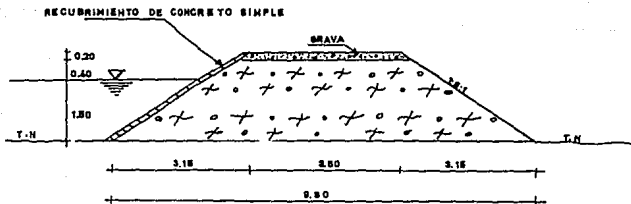
71

FIGURA 9

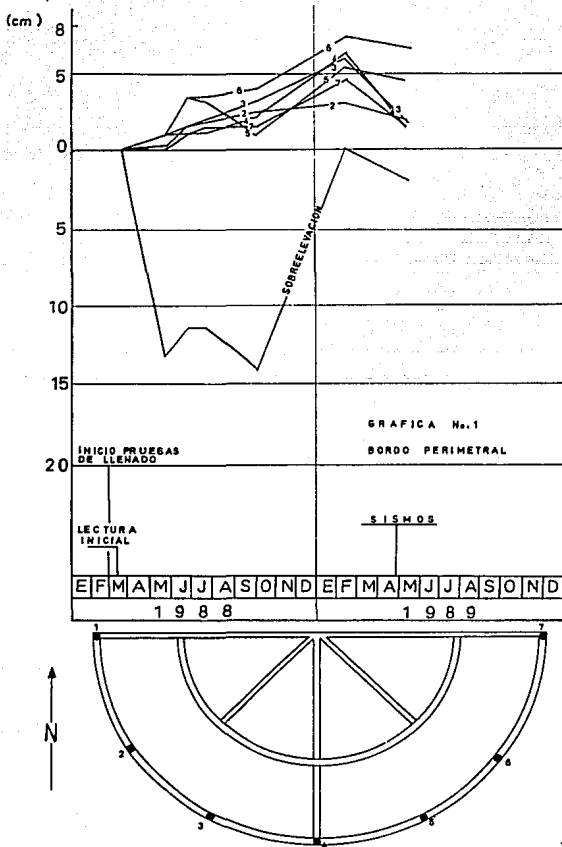
FIGURA 10



BORDOS INTERMEDIOS



BORDOS PERIMETRAL Y RADIAL



de Distribución a lo largo de su eje longitudinal, como se puede ver en la fig.4. Tiene una longitud de 800m; es una estructura trapecial de tepetate semicompactado (Fig.10).

El comportamiento de ésta estructura (testigos 10 a 14); presenta un asentamiento máximo de 3.40cm, detectado en el testigo 12. El bufamiento máximo a 1989 era de 2.7cm, y se presenta en el testigo 13; el mínimo era de 1cm en el testigo 16 (gráfica 2). El máximo movimiento diferencial es de 6.10cm, con una velocidad máxima de movimiento de 0.31cm/mes.

6.4.- Canal de Distribución

Es una estructura de concreto armado, como se observa en la figura 11; los canales se construyeron sobre un bordo de tepetate semicompactado de forma trapecial con 5.20m de base, 3.0m en la corona y con una altura de 0.75m. El canal de distribución mide a lo ancho 1.50m y tiene una altura de 1.60m.

Este canal divide las lagunas primarias A1 y A2 de las lagunas secundaria y terciaria B y C; tiene forma de semicírculo, con una longitud de 1256m; en cada uno de los extremos es recto y mide 220m.

Esta estructura ha presentado un asentamiento máximo de 2.7cm, como se puede ver en el testigo 18; el mínimo es de 0.90cm en el testigo 23,

el máximo diferencial es de 6.1cm, entre los testigos 18 y 21, y los bufamientos máximo y mínimo fueron de 3.4 cm (testigo 21), y de 1.7cm respectivamente. La velocidad máxima de movimiento es de 0.31cm/mes (gráfica 3).

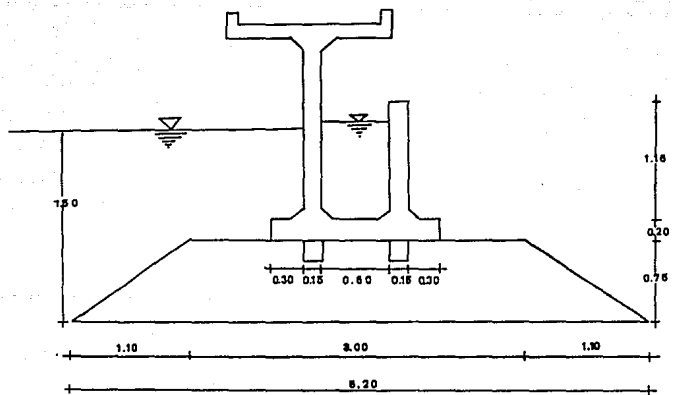
Para obtener la secuencia del comportamiento de la obra, y detectar situaciones que puedan alterar su funcionamiento, se necesitan realizar nivelaciones periódicamente; para la planta en estudio (Lagunas Facultativas con Recirculación), se realizan trimestralmente.

Dada la situación que se presenta en las uniones de las estructuras de concreto y terracería, es necesario realizar estudios más detallados, para no tener las complicaciones que se presentaron, en obras futuras.

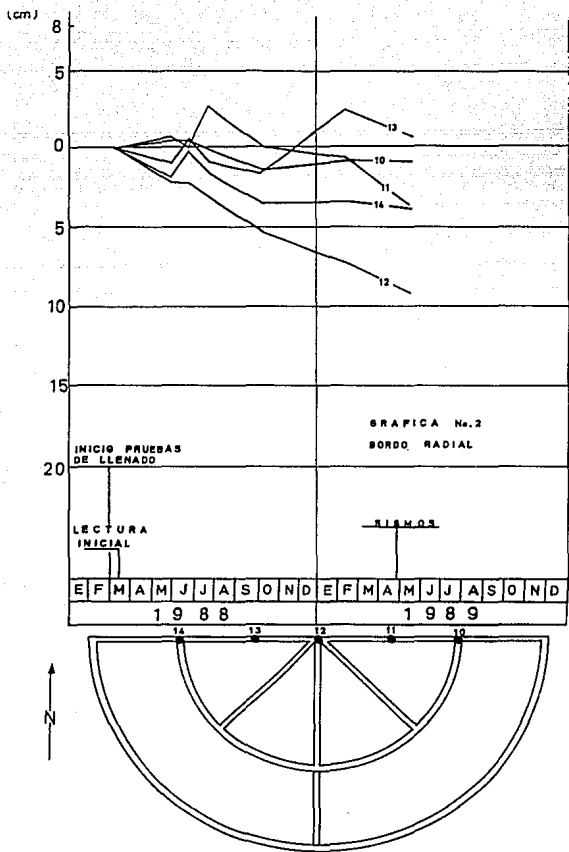
En la zona donde se localiza el testigo 1, el bordo tuvo el asentamiento máximo registrado en toda la obra, por que alrededor de ésta zona se depositó material, originando una concentración de esfuerzos que provocó, a su vez el asentamiento ya mencionado.

El lugar donde se localiza el testigo 12, presenta un asentamiento de 9.0cm, debido a la concentración de esfuerzos, provocados por las estructuras que aquí se encuentran, como son la estructura de entrada, de salida, de recirculación y el bordo radial.

FIGURA 11



CANAL DE DISTRIBUCION



El bufamiento máximo es de 8.20cm y se presenta en el testigo 21, localizado en el Canal de Distribución.(Gráfica 3)

6.5.- Flotación del Canal Central

Para el llenado de la Planta de Tratamiento, se vertió agua en las lagunas adyacentes al canal central (Fig. 12). Como este canal fue la última parte de la obra en llenarse y teniendo un tirante de 1.50m de agua en las lagunas, se presentó una subpresión que lo indujo a flotar debido al principio de Arquímedes.

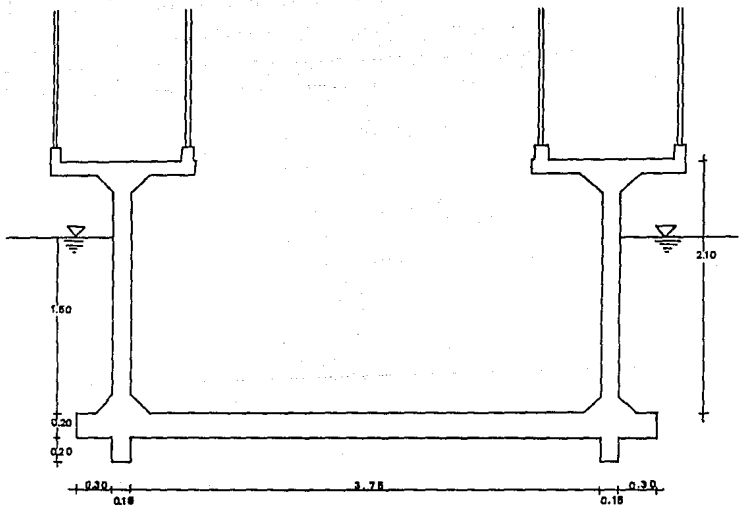
Para corregir la flotación se construyó, como solución provisional, un muro vertedor, hecho de costales, en el Canal Central, para compensar la subpresión provocada por el agua de las Lagunas.

La subpresión ejercida contra el canal fue calculada y en base a ella se recomendó la altura del tirante mínimo de 0.60m que deberá permanecer en él permanentemente para evitar movimientos ulteriores.

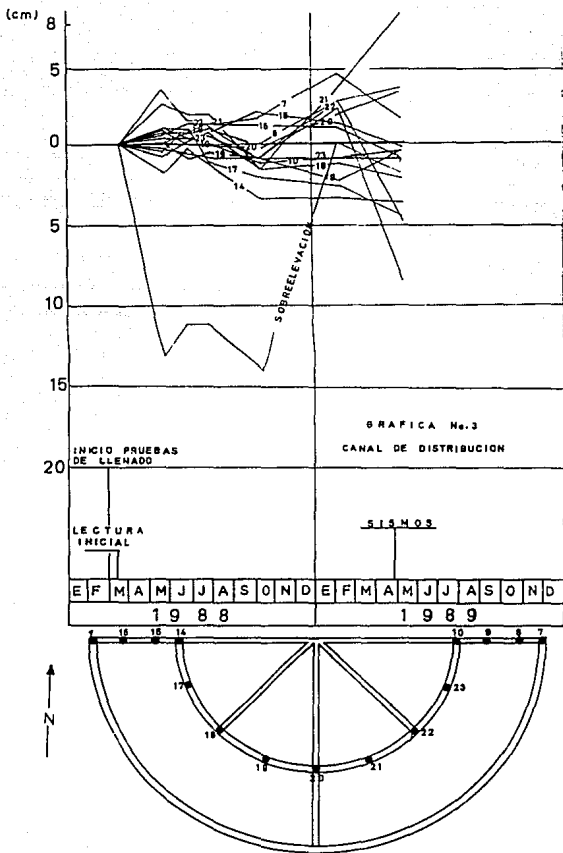
Con éste dato, y utilizando la costalera se llevó a cabo la construcción definitiva de un muro vertedor dentro del canal central.(Grafica 4)

Hasta el momento la medida ha funcionado adecuadamente; de acuerdo con las nivelaciones semanales del canal, éste ha recuperado la

FIGURA 12



CANAL CENTRAL



flotación que se presentó durante el llenado.

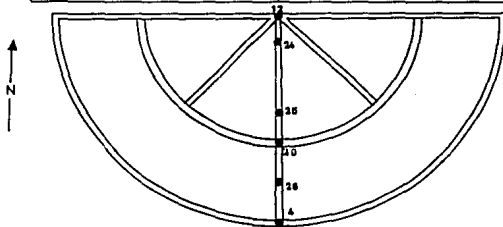
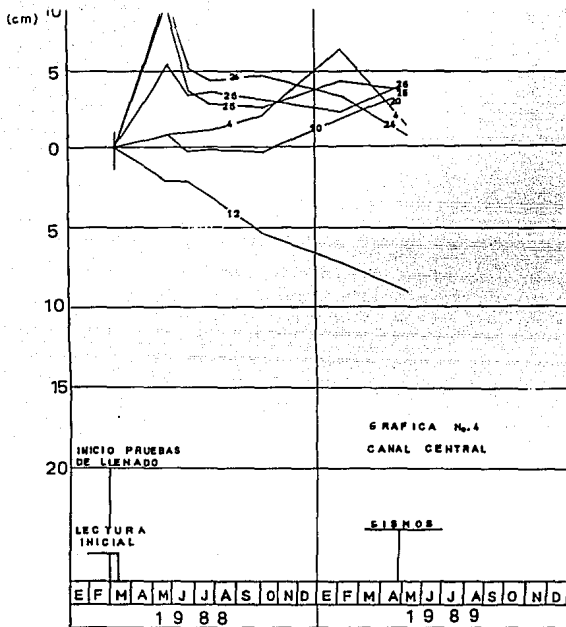
Cabe señalar que el asentamiento máximo registrado en los testigos, es de 15.20cm, presentándose entre el testigo 1, que se localiza sobre el bordo del módulo 1, y el testigo 5, ubicado en el Canal Central.

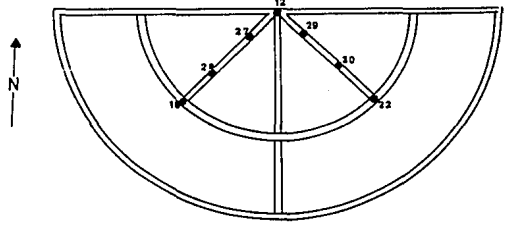
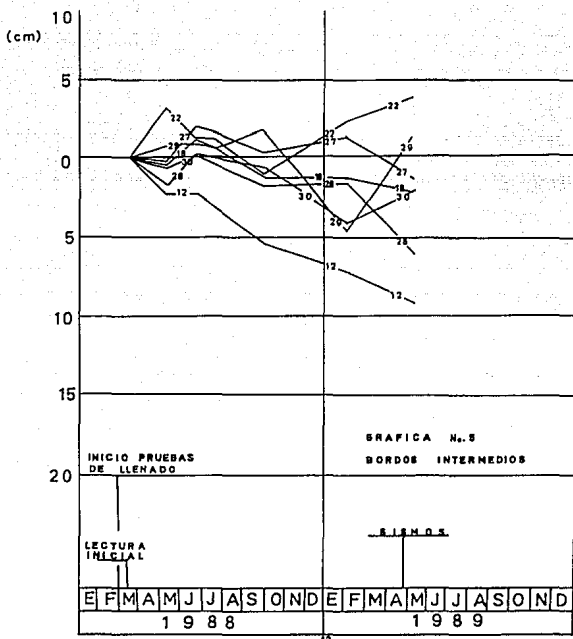
La velocidad máxima de asentamiento, se obtiene del testigo 1, siendo de 0.77cm/mes. Lo anterior significa que el bordo del módulo 1, es la estructura con mayor velocidad de asentamiento.

La estructura que presenta menor velocidad es el Canal Central, con 0.35cm/mes. Debido al tirante de agua en las lagunas adyacentes que le imponen una subpresión al canal, por lo que el asentamiento se debe a la carga hidráulica impuesta en el fondo de las lagunas.

Pero cabe señalar que los asentamientos actuales presentados en las estructuras de concreto favorecen el flujo de agua por gravedad.

Los asentamientos máximos se localizan en las estructuras térreas (bordo - módulo), lo que implicaría sobre elevar el bordo para conservar la capacidad de embalse, no requiriendo mayores soluciones.





7.- MEDICIONES Y OBSERVACIONES

La planta de tratamiento se alimenta de las aguas residuales provenientes del río Churubusco, aprovechando la misma obra de toma que se construyó para abastecer la planta existente de lodos activados, habiéndose realizado únicamente la derivación para las lagunas facultativas. El agua cruda se mezcla con el agua tratada para enriquecerla de oxígeno y entra a las lagunas primarias; por efectos de tirante pasa a las lagunas secundarias y es recolectada en el canal central. Parte del gasto de agua tratada se recircula y el resto se bombea a la caja de almacenamiento, de donde se envía al sitio de aprovechamiento.

7.1.- Funcionamiento de la Planta

El proyecto original de la planta recomendaba "terraplenes con un ancho de corona de 4m y taludes 2:1 ($\beta = 27^\circ$). A la altura requerida de los terraplenes se le agregarán 50cm de altura, debido al hundimiento de los terraplenes durante la construcción. Los taludes húmedos de los terraplenes se protegerán con concreto y los taludes secos se recubrirán con pasto". (Planimex, 1983a)

a).- Llenado

Al momento del llenado se observaron los primeros problemas en la obra:

Se presentó un flujo de agua bajo el bordo perimetral, el bordo radial y en el canal de distribución, en la parte radial. Las fugas del bordo perimetral se presentaron sobre todo a continuación del bordo radial en los tramos oriente y poniente; estas fugas fueron sobre todo por debajo del contacto suelo-bordo y suelo-estructura, así como en algunos tramos en donde existían juntas constructivas; eran localizadas, puntuales. Además se detectó el hundimiento de la esquina poniente, del cárcamo de bombeo de aguas tratadas y la flotación del canal central.

b).- Sellado de Fugas

A las fugas en la parte interior del canal de distribución no se les atribuyó importancia, puesto que éstas se compensarían hidráulicamente al cubrirse completamente los estanques de agua.

Con objeto de frenar las fugas perimetrales, se propuso como solución la colocación de bentonita en la parte interna del bordo, con un enrocamiento de 50cm de espesor (Fig. 6), complementada con el canal colector de agua filtrada, para llevarla a pozos de filtración, tipo indio. La

solución realizada fue construir una berma exterior de 220m de largo, 0.75m de altura en promedio y 6m de ancho; el material utilizado para dicha berma fue la arcilla local, bandeada con tractor D-6. Esto se construyó en ambos lados, oriente y poniente, sin embargo, el canal colector de agua filtrada solo se construyó en el lado poniente. A la fecha esta solución, no construida en su totalidad, ha funcionado de manera adecuada.

En la parte interior las soluciones realizadas fueron diferentes. En el costado oriente y dado que existió un tirante de agua promedio de $h=60\text{cm}$, se colocó bentonita a volteo en las zonas de fugas localizadas; para disminuir el gasto de estas fugas se colocó costalera del mismo material bentonítico también a volteo. El efecto fue a mediano plazo en un período de 15 a 25 días, la bentonita arrastrada por el agua hacia las fugas selló su propio camino, taponándose las salidas. En la zona interior poniente, que se encontraba seca, se procedió a colocar costalera apoyada sobre una berma de arcilla local; esta berma tuvo un ancho de 1m y fue rematada con una hilera de costales, colocados de uno en uno a todo lo largo del muro.

La segunda parte de la reparación consistió en una berma más ancha, de 4m, que solo alcanzó a cubrir la mitad poniente de dicho muro. Lo anterior debido a la presencia del agua que comenzaba a inundar la laguna. La solución al igual que la anterior, funcionó adecuadamente; al ser arrastrada la bentonita, taponeó su propio camino.

El objeto de las bermas interior y exterior, fue el desarrollar una red de flujo más larga, que permitiese abatir el gradiente hidráulico que se generó con la creación del tirante de agua. Se considera que con la presencia de las bermas seguirán existiendo las fugas por debajo del contacto suelo-estructura, pero la salida del agua será menos dañina por tener menor velocidad y poder de arrastre, además de ser captada por el canal colector que se le colocó a lado de la berma, y de ahí procederá a ser infiltrada, evitando así la creación de encharcamientos periféricos.

Además de lo anterior, en los muros de concreto y en las juntas de dichos muros se observaron fugas. Aquellas a través del concreto no se tocaron y, dada la presencia de sales y materia orgánica disueltas en el agua, esas mismas se encargaron de taponearlas.

Para sellar la fugas en las juntas, se aplicaron diferentes métodos pero el que mejor funcionó fue el de demoler el concreto hasta llegar al refuerzo y colar nuevamente, colocando un sellador hidráulico en las juntas.

c).- Asentamientos de la Estructura

El proyecto contemplaba tres diferentes tipos de estructura; una pesada con carga concentrada, de concreto, que era el Cárcamo de Bombeo; otra una estructura térrea de 2.10m de altura, con una base de

9.80m, y una corona de 3.50m, que eran los bordos radial, intermedio y perimetral; la tercera eran cajones de concreto, que formaron los canales de distribución y central.

Los bordos transmiten una carga lineal de 23.73ton/m, mientras que los canales transmiten 1.75ton/m vacíos y 2.96ton/m llenos.

La diferencia de descargas al subsuelo, en sus diferentes fases: vacío, llenado y lleno, transmiten cargas muy diferentes que por ende generan asentamientos muy diferentes, considerando siempre el mismo tipo de suelo.

Los asentamientos diferenciales comenzaron a observarse desde la etapa de construcción en que los bordos de tierra comenzaron a asentarse y los canales de concreto permanecieron fijos, creándose asentamientos diferenciales en sus contactos (BNA, BNB, BND, BNE, BNF, BNO, BNP, BNX), como se observa en las nivelaciones que se presentan en la figura 5 (Oct. 1988).

Al momento del llenado se presentaron nuevos problemas y nuevos asentamientos. El cárcamo de bombeo, se asentó a gran velocidad, de manera casi instantánea creando problemas en todo su entorno, sobre todo en el canal central. Los bordos intermedios y radial también sufrieron asentamientos, aunque menores, tanto por los suyos propios, como por el hecho de ser estructuras flexibles y poderse adaptar a los asentamientos del

terreno, siguiéndolo. Cabe resaltar que mientras estuvo el cárcamo vacío no presentó problemas de asentamientos.

d).- Flotación del Canal

Para el llenado de la Planta de Tratamiento, se vertió agua en las lagunas adyacentes al canal central. Como este canal fue la última parte de la obra en llenarse y teniendo un tirante de 1.50m de agua en las lagunas, se presentó una subpresión que lo indujo a flotar debido al principio de Arquímedes.

Para corregir la flotación se construyó, como solución provisional, un muro vertedor, hecho de costales con suelo, en el Canal Central, para compensar la subpresión provocada por el agua de las lagunas.

La subpresión ejercida contra el canal fue calculada y en base a ella se recomendó la altura del tirante mínimo de 0.60m que deberá permanecer permanentemente para evitar movimientos ulteriores.

Con este dato y utilizando la costalera se llevó a cabo la construcción definitiva de un muro vertedor dentro del canal central.

e).- Asentamientos en la Esquina Poniente

Desde un principio, como ya se mencionó, este costado tenía una cota más baja que el resto del terreno e igualmente las propiedades del subsuelo eran de menor calidad, por lo cual la altura de los bordos debió ser mayor que el resto y por ende las descargas al subsuelo fueron mayores. Esto originó fuertes asentamientos en el lugar, como ya fue descrito.

Posteriormente, con objeto de poder igualar los niveles de embalse dentro de la laguna, sin derramarse por ese lado por efectos de oleaje, se elevó el bordo poniente 50cm, generándose nuevos asentamientos que originaron que el canal de distribución, vecino al bordo poniente quedará ahogado en sus tubos de salida.

Igualmente se generaron nuevas fisuras en los muros de concreto y para evitar fugas se dejaron fuera de servicio dos paneles.

f).- Consecuencias

El uso de la topografía es decisiva en cualquier tipo de obra, particularmente las hidráulicas. El realizar un levantamiento topográfico en la zona donde se ubicará una obra, conocer los niveles y dar seguimiento a la misma, para determinar pendientes que a simple vista no se observan,

debe ser indispensable.

Por la falta de estudios de mecánica de suelo con muestras del sitio en que se encuentra la obra, las propiedades del suelo que se consideraron para el proyecto resultaron ser diferentes a las reales, ocasionando que las estructuras que se pensaban compensadas, no lo están, provocando problemas de asentamiento.

La diferencia de pesos entre estructura vacía y llena, en el cárcamo de bombeo, fue de tal magnitud que provocó un asentamiento súbito al momento del llenado. Este asentamiento, aunque calculado en forma adecuada, no se previó de manera instantánea, sino diferida con el tiempo.

Debieron llenarse de agua los canales para que se asentaran al parejo de los bordos y se probaran hidráulicamente.

En las vecindades de los diferentes cuerpos de la estructura, que tienen descargas diferentes al subsuelo, se presentan asentamientos diferenciales que dañan las estructuras, sin embargo, éstos han sido tomados por la flexibilidad de las estructuras térreas.

Los efectos sísmicos sobre estas estructuras son importantes puesto que sus elementos son muy esbeltos y de una gran longitud. En los sismos del 8 de Febrero de 1988 y sobre todo el del 25 de Abril de 1989, en donde

varios de los bordos presentaron zonas de compresión, abombándose horizontalmente y fracturando algunas losas de concreto que forman parte de su recubrimiento. Igualmente se observó un hundimiento diferencial instantáneo de la subestación eléctrica.

Todos los problemas anteriormente descritos, a excepción del hundimiento de la esquina poniente, que aún continúa, se presentaron durante el llenado; actualmente la planta tiene un comportamiento estable y su operación ha sido normal y satisfactoria.

8.- CONCLUSIONES

1.- *El reuso de las aguas negras por medio de Lagunas Facultativas, es una de las tantas soluciones para las aguas negras, sobre todo para este caso del Ex-lago de texcoco, donde si no se reciclan, sería enorme el gasto que lo cruce y ademas los mas importantees que se ahorra agua potable, ya que esta agua tratada utilizada en riegos y agricultura, evita que se desperdicie el agua de primera necesidad.*

2.- *El tratamiento de aguas negras por medio de lagunas facultativas de recirculacion, es un metodo económico y adecuado para regenerar las aguas usadas, empleandolas en uso agricola. El consumo de Energía Eléctrica que necesita es mínimo y la eficiencia es satisfactoria. Una limitante importante pudiera ser la gran cantidad de terreno que necesita; pero para este caso, no es un gran problema, sino al contrario, ya que al construir esta planta en el ex-lago de texcoco, se evitaran tolvaneras en esas 64Has que ocupa.*

3.- *El uso de la topografía es decisiva en cualquier tipo de obra, particularmente en obras hidráulicas. El realizar un levantamiento topográfico en la zona donde se ubicará la obra, conocer los niveles y dar seguimiento a la misma, para determinar pendientes que a simple vista no se observan, debe ser indispensable; de lo contrario ocurren problemas tanto al momento de la construcción, y sobre todo al termino de la obra,*

como en éste caso. en que la falla se presenta al momento del llenado.

4.- La diferencia de pesos entre estructura vacía y estructura llena, en el caso del cárcamo de bombeo, fue de tal magnitud, que provocó un asentamiento súbito al momento del llenado. Este asentamiento, aunque calculado no se preveía de manera instantánea, sino diferida con el tiempo.

5.- Cabe mencionar, que no en toda la planta se presentaron asentamientos tal y como se explico por medio de los testigos, hubo incluso sobreelevaciones, debidos a las condiciones del suelo (Arcilla de alta plasticidad, baja resistencia y muy comprensible) y a la presión del agua contenida en este tipo de suelo.

6.- Al igual que el carcamo de bombeo, los canales también debieron haberse llenado, para ser probados hidráulicamente antes de poner la plnata a funcionar. De esta manera se hubiera presentado un asentamiento más uniforme.

7.- En las vecindades de los diferentes cuerpos de la estructura, que tienen descargas diferentes al subsuelo, se presentan asentamientos diferenciales que han sido tomados por la flexibilidad de las estructuras térreas que conforman la obra, sin embargo, ésto en algunos sitios originó fugas que fueron controladas por medio de la berma y costalera ya mencionadas.

8.- *La operación de la planta ha sido normal, sin mayores contratiempos que los antes mencionados, durante la etapa del llenado inicial y la puesta en marcha de la planta; la planta vacía no presentó problema alguno.*

9.- *Las fallas en la planta al momento del llenado, fueron entre otras cosas a consecuencia de no construir cada una de sus partes como lo marca el proyecto original; sino que por economía se utilizó una resistencia menor y la cimentación que se había planteado como compensada, no se realizó correctamente ya que no se hicieron los estudios necesarios de mecánica de suelos ni sondeos necesarios y en los que se hicieron no se excavó a una profundidad adecuada, es por ello que al llenado de la estructura provocó una falla debida a la incorrecta cimentación y a las condiciones del suelo. Además el cárcamo de bombeo que debio construirse al inicio, se construyo al final, provocando un asentamiento súbito como ya se menciona.*

BIBLIOGRAFIA.

- **CLT., DIRECCION DE GEOTECNIA. 1988.**
"INFORME DE LAS NIVELACIONES DE LAS LAGUNAS FACULTATIVAS".
INFORME INTERNO.

- **HEREDIA M., 1985.**
"TECNOLOGIA MODERNA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES".
REVISTA INGENIERIA HIDRAULICA EN MEXICO VOL.1, NUM.1, 2a.EPOCA.

- **MORALES R., POZO F., MONDRAGON E., 1989.**
"MEMORIA TECNICA DE LA PLANTA DE TRTAMIENTO DE AGUAS NEGRAS CON
LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION".
REVISTA INGENIERIA AMBIENTAL, AÑO 2, No.6.

- **MORALES R., MURILLO R., 1991.**
"COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS BLANDOS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO".
SEMANA DE LA GEOTECNIA. ESIA. IPN. SMMS.

- **PLANIMEX, 1983-A.**
"ESTUDIO DE UNA PLANTA DE LAGUNAS FACULTATIVAS CON RECIRCULACION".

- **PLANIMEX, 1983-B.**
"PROGRAMA DE OPERACION DE UNA PLANTA DE LAGUNAS FACULTATIVAS CON
RECIRCULACION".

- **SI DE AGUA SE TRATA....., NOV./1990,**
REVISTA OBRAS.

**- JUAREZ BADILLO E., RICO R. A.,
"MECANICA DE SUELOS TOMO 1".,(FUNDAMENTOS DE LA MECANICA DE
SUELOS).**

ED. LIMUSA 3a.EDICION. MEXICO 1982. PP. 641.

- IDEM. TOMO 2.

- PROYECTO TEXCOCO.

**"MEMORIA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS Y CONCLUSIONES",
SHCP. FIDUCIARIA NAC. FINANCIERA S.A. MEXICO 1969. PP. 207.**