

LA PLANTA DE DESALACION DE AL KHOBAR, EN ARABIA SAUDITA (*)

Por C. A. ANSOLDI

Ingeniero División Obras Civiles - Italconsul S. p. A.

F. BARLUZZI

Ingeniero Consultor.

E. MARAINI

Ingeniero, Director Adjunto de Italconsul S. p. A.

La insuficiencia de recursos de agua potable para el consumo de vastas zonas hace necesario recurrir a la desalinización de agua del mar. El artículo describe una de estas plantas, con una capacidad de producción próxima a 30.000 m³/día, haciendo especial mención de la obra civil, presa en el mar, condiciones de agua y protección de tuberías.

Introducción.

Antes de ilustrar la génesis de este proyecto, desde los primeros estudios de factibilidad técnico-económica hasta la realización de este, en muchos sentidos, imponente conjunto, es útil mencionar la situación económica, política y social que llevó al Gobierno de Arabia Saudita a enfrentar un problema que, en un contexto hidrogeológico particular, refrenaba desde miles de años el desarrollo de la parte más rica del país, atrasando su progreso.

La provincia oriental de Arabia Saudita comprende un vasto territorio, riquísimo en yacimientos petrolíferos, que se extiende a lo largo del Golfo Pérsico, desde el Kuwait hasta el Qatar.

La civilización, el petróleo, las comunicaciones y las recientes actividades industriales, se asentaron a lo largo de la estrecha faja costera en donde encontramos las ciudades más importantes: Dammam, Qatif, Al Khobar. En esta faja costera el terreno, geológicamente constituido por un depósito arenoso superpuesto a bancos de margas y calizas, nutre grandes oasis de verdes palmares que obtienen su alimento de las capas acuíferas subyacentes.

En efecto, a lo largo de la llamada Coastal Belt se encuentran cuatro capas superpuestas, a veces entremezcladas, con salinidad que va-

ría entre 2.500 y 4.000 p.p.m. y temperatura que oscila alrededor de los 35° C.

La profundidad a la que se encuentran las diversas capas varía de pocos centímetros para la capa superficial (en Dammam y Sayhat en particular) hasta los 700-800 m y más para Umm Er Raduma, la más profunda y rica en sales disueltas. La elevada salinidad por sí sola sería suficiente para aconsejar una drástica intervención de desmineralización, pero sus consecuencias son aún más importantes. En efecto, la elevada concentración de sales es perjudicial para la agricultura, y el clima extremadamente cálido provoca una evaporación rapidísima, a pesar de una elevadísima humedad relativa (99 por 100 en otoño). Por lo tanto, el riego produce un constante depósito que debe ser continuamente deslavado con nuevos riegos, los cuales, a su vez, producen más depósitos.

La consecuencia de este verdadero y propio círculo vicioso es que la capa acuífera está literalmente saqueada por continuos e indiscriminados bombeos, hasta el punto de que la superficie piezométrica de las capas baja 30 ÷ 40 cm cada año, planteando para el futuro una serie de problemas dramáticos.

Considérese que el descenso de la capa acuífera ha provocado, en la isla de Bahrein, a 20 Km del continente, una reducción de presión tal que se verifican infiltraciones de agua de mar en dicha capa.

En consideración de la peculiar necesidad de agua potable, además de todos los estudios hidrogeológicos, el Gobierno encargó a Italconsult efectuar una investigación sobre la posibi-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1974.

lidad de abastecer las ciudades más importantes de la zona oriental con agua desalada.

Se hicieron cálculos de previsión del incremento de la población y en base a una población estimada en 250.000 personas y un consumo promedio per cápita de 160 litros por día, se estudiaron sobre todo dos esquemas.

El primero para una planta de 30.000 m³ de agua destilada del agua de mar con distribución a las ciudades de Al Khobar, Dammam, Sayhat, Qatif y Safwa, y subsiguiente mezclado con agua de pozo hasta alcanzar una salinidad total oscilando entre 500 y 1.000 mg/l.

El segundo esquema preveía la realización de dos plantas de electrodiálisis, abastecidas con agua de pozo en Dammam (30.000 m³/día) y en Al Khobar (19.000 m³/día).

La comparación entre las dos alternativas revela variaciones modestas, por lo que se refiere a la conveniencia entre una y otra solución, según se asuman diversas hipótesis financieras, requiriendo la primera solución un mayor coste de capitales que la segunda.

En tales condiciones, la elección vino determinada por otros factores, tales como:

- La adopción del sistema de la destilación aseguraría la uniformidad técnica con las plantas futuras a realizar en la zona, porque para estas últimas se podía fácilmente prever el empleo del ciclo combinado agua destilada-central termoeléctrica de vapor con motivo del paralelo aumento de la demanda de energía eléctrica y de las consabidas economías de ejercicio de este ciclo.
- La destilación del agua de mar y su excesivo mezclado con agua salobre de pozo permitiría notables economías en la explotación de las aguas subterráneas.
- Esta economía, aunque difícilmente expresable en términos cuantitativos, presentaba, de todos modos, ventajas innegables en un país árido, en donde una explotación excesiva de las capas acuíferas produce el avance de la cuña salina y, por consiguiente, el aumento de la salinidad de las capas subterráneas.
- Tercera, pero no última, consideración fue la determinada por el hecho de que, cuando se efectuaron los estudios en cuestión, ya se había decidido la reali-

zación, en la costa occidental de Arabia Saudita, utilizando las aguas del Mar Rojo, de una planta de desalación del tipo de destilación rápida.

Por consiguiente, era necesario procurar limitar, en lo posible, una proliferación de los varios sistemas de desalación rápida (como aconteció, en cambio, en otros países), en cuanto en un país en vías de desarrollo, donde la disponibilidad de personal especializado es muy limitada, ello seguramente hubiera originado dificultades de orden práctico, además del aumento de los costes de ejercicio.

En base a las consideraciones hechas más arriba, se decidió la construcción de una planta con producción de unos 30.000 m³/día.

Se estableció que la planta sería del tipo de finalidad única, es decir, destinada sólo a la producción de agua destilada, puesto que la existencia de centrales con turbinas de gas situadas tierra adentro y que ya están ampliándose, no hacía conveniente, en dicha primera fase de empleo de la desalación, recurrir a ciclos con finalidad doble.

El Gobierno de Arabia Saudita, en 1968, le confió a Italconsult la tarea de proyectar la planta en cuestión. Dicha tarea preveía que se adaptara a las condiciones locales el Universal Design elaborado por el OSW (Office of Saline Water, del Departamento de Asuntos Interiores de los Estados Unidos).

Partiendo de algunos parámetros, entre los cuales cabe recordar:

1. Coste del combustible:	8,5 ptas./MBTU
2. Gravámenes fijos de capital:	6 %
3. Coste de energía eléctrica:	1,3 ptas./kWh
4. Coste del ácido sulfúrico:	2.700 ptas./Tm
5. Coste de la sosa cáustica:	8 ptas./Kg
6. Coste del vapor:	0,046 ptas./1.000 Kcal
7. Temperatura del agua de mar:	29,5° C

se procedió a la optimización de la planta, es decir, a determinar la relación de transformación que diera el mínimo coste de producción.

Los proyectistas se orientaron, por tanto, hacia una relación de transformación de 9,70 Kg de agua destilada por kilogramo de vapor producido y el ciclo se desarrollaba en 34 estadios.

Las características de la planta, abastecida por la sociedad americana Aqua Chem, son las siguientes:

Número de los estadios:	34
Temperatura máxima a la salida del calefactor de salmuera:	121° C
Consumo total de combustible:	87 × 10 ⁶ Kcal/h
Consumo de energía eléctrica por cada hora de ejercicio con toda la carga posible:	3.096 kWh
Consumo de ácido sulfúrico con toda la carga posible:	440 Kg/h
Cantidad máxima admitida de sales residuales disueltas en el agua producida:	25 p.p.m
Capacidad de producción garantizada:	28.400 m ³ /día
El coste final evaluado del agua producida y transportada a los centros de consumo se estimó en:	15 ptas./m ³
Y el del agua potable en:	10 ptas./m ³

La presa en el mar.

La poca profundidad del fondo marino ha requerido una obra de presa en el mar constituida por una estación de bombeo situada al final de una plancha, de 183 metros de largo, que entra en el mar hasta alcanzar una profundidad de 7 metros.

La plancha se ha realizado con una viga cajón de cemento armado precomprimido, con tramos de 20 metros de luz que apoyan en estribos de 80 cm de espesor, sostenidos por cuatro postes amarrados en el fondo marino. La viga cajón realizada con el método de precompresión Dywidag, se mantiene rígida por medio de un tabique longitudinal de hormigón armado, también precomprimido, de 25 cm de espesor en el alma. Dicho tabique, además de constituir un elemento de sostén para la rigidez de la estructura, forma dos canales destinados al transporte del agua marina de anchura 1.460 mm y altura 1.500 mm, que por un lado permiten una capacidad de transporte mayor de la requerida en previsión de la futura ampliación de la planta y, por otro lado, una manutención más fácil por el uso alternado de los dos conductos. La plancha tiene un carril de 4 metros y dos aceras laterales de 1,20 metros de ancho. Al final de la plancha se encuentra la estación de bombeo, con cuatro bombas que ofrecen una capacidad de 1 m³/seg., con una preponderancia de 6 metros cada una. El ciclo normal de funcionamiento prevé la operación simultánea de tres bombas, constituyendo la que queda una reserva de capacidad del 30 por 100.

Como ya se dijo, la viga-canal-plancha está apoyada en once grupos de cuatro postes con 80 cm de diámetro amarrados en el fondo marino.

Al iniciar las obras, puesto que los sondeos efectuados habían revelado que el fondo marino estaba constituido exclusivamente por arena, la empresa constructora había empezado los trabajos clavando en el fondo unas camisas de acero de 12 mm de espesor en su pared y cerradas en la extremidad inferior.

Dichas camisas se clavaban no menos de 6 metros en el fondo arenoso por medio de inyecciones de aire comprimido y luego se golpeaban hasta el rechazo con 120 golpes de mazo de 2 toneladas.

Gasoducto.

El gas natural para alimentar las calderas de las unidades de desalación y de las turbinas de gas llega desde los campos petrolíferos de ARAMCO, situados en el desierto de Abqaiq, 50 Km al oeste de la planta.

El gasoducto, destinado a los futuros consumos de la planta de desalación (cuya capacidad dentro de poco deberá triplicarse), está en condiciones de transportar 1.000.000 de m³ de gas natural por día.

La tubería, de acero API 5LX-X42, tiene un diámetro de 12 pulgadas y está equipada con una planta de tratamiento del gas a su llegada (deshidratación, reducción de presión y postcalefacción).

Ha sido colocada en trinchera en las zonas arenosas, y al aire libre en las zonas de desierto salado y está dotada con instrumentación y equipos aptos para garantizar su funcionamiento sin interrupciones.

Obras civiles.

La realización de la planta necesitó también la ejecución de obras civiles de particular importancia, que fueron ejecutadas por un consorcio alemán-libanés constituido por Siemens-Bauunion, de Munich y por Kettenah Frères, de Beirut.

A continuación se describen las obras civiles más importantes desde el punto de vista técnico.

Para el cálculo de la carga de los postes, los proyectistas siguieron la llamada fórmula de los holandeses:

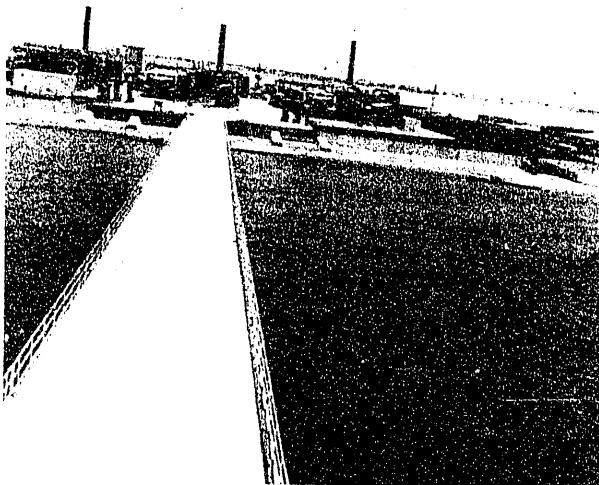
$$R_{ij} = \frac{MH}{e} \times \frac{M}{M + P}$$

donde:

- R_{ij} = resistencia dinámica del poste (en toneladas).
- M = peso del mazo (en toneladas).
- H = altura de caída del mazo.
- P = peso de la camisa (en toneladas).
- e = rechazo (en milímetros).

Después se ha atribuido un coeficiente de seguridad:

- $i = 10$ (mazo con caída libre)
- $i = 5$ (martinete de vapor)



Vista de la planta desde la presa en el mar.

Luego se efectuaron pruebas de carga en los postes clavados según las normas ASTM, asumiendo una carga de prueba igual a 1,5 veces la carga máxima prevista.

Cuando ya se habían clavado ocho camisas, sin problemas, en agosto de 1971, la empresa tuvo problemas al encontrar algunas formaciones erráticas lenticulares de corales muertos que daban el rechazo mucho antes de haber llegado a la profundidad mínima impuesta por

los proyectistas. Dichas formaciones erráticas, aunque de espesor muy limitado, de unos 10-20 cm, impedían la penetración de la camisa, puesto que —siendo ésta de fondo cerrado— descargaba en la masa rocosa una carga de menos de 1 Kg/cm², insuficiente para romper la lente de coral sumergida en el fondo de arena compacta.

Por consiguiente se modificó el sistema y se emplearon camisas con fondo abierto que penetraron fácilmente en las masas coralinas.

Una vez clavadas hasta el rechazo, las camisas se vaciaban y se pasaba a la fase de armado y consiguiente inyección y vibrado del hormigón.

El conducto del agua destilada.

Una de las características principales de este conjunto, sobre todo desde el punto de vista de la ingeniería civil, está constituida por el conducto de agua destilada que, desarrollándose en 70 Km, representa la realización más importante de este tipo que existe en el mundo.

A continuación se describe brevemente esta obra que ha presentado muchos problemas, tanto a los proyectistas como al constructor.

Uno de los primeros problemas que los proyectistas tuvieron que solucionar vino impuesto por la importancia cuantitativa de esta obra, que hizo asumir a la elección del material para las tuberías un interés grande desde el punto de vista económico, además de técnico.

Los tres tipos fundamentales de tubos para conductos de agua (acero, fundición maleable y cemento-amianto) se confrontaron con particular atención en los siguientes aspectos:

- a) Corrosión interior.
- b) Corrosión exterior.
- c) Problemas de transporte y colocación.
- d) Características mecánicas y de duración.
- e) Coste.

a) *Corrosión interior.*

Desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión provocada por un agente agresivo tal como el agua destilada, el material más apto es el cemento con bajo porcentaje de hidróxido de calcio, por ejemplo el cemento de horno.

Un revestimiento interior de cemento de 5 ó 6 milímetros de espesor (para tubos de 500 mm de diámetro) se puede aplicar en la fábrica al interior de los tubos de acero o de fundición. En los tubos de cemento-amianto, en cambio, el cemento con escaso contenido de hidróxido de calcio forma parte no como revestimiento, sino como ingrediente esencial de la tubería misma que, por tanto, resulta intrínsecamente resistente a la corrosión, teniendo un espesor del orden de los 40 mm o también mayor.

Otro barnizado contra la corrosión, en función del contenido de minerales en el agua, se puede aplicar sobre el estrato de cemento tanto en los tubos metálicos como en los de cemento-amianto. El revestimiento de cemento aplicado dentro de los tubos metálicos es esencialmente impermeable.

En caso de que, después de cierto tiempo, el agua destilada consiga penetrar por los poros del cemento, llegando a atacar químicamente el metal, se formaría hidróxido de hierro soluble que se depositaría sellando de nuevo los poros.

Este proceso de autoimpermeabilización es eficaz también en caso de que se produzcan accidentalmente pequeñas grietas, del orden de 0,5-1 mm en el revestimiento de cemento. Pero, en todo caso, el fluido transportado no debe superar una determinada velocidad de seguridad.

El cemento-amianto, a su vez, es intrínsecamente impermeable por su estructura misma, y también sin barnizado de protección en el interior el agua puede penetrar en los poros todo lo más uno o dos milímetros, lo que, frente a un espesor de la pared de algunos centímetros, no constituye peligro alguno.

b) *Corrosión exterior.*

En el caso de las tuberías enterradas de metal, el fenómeno de la corrosión exterior es determinado por el ataque químico del suelo, por la acción de las bacterias y por las corrientes erráticas.

En general, para protegerse del ataque químico se aplica al exterior un revestimiento bituminoso o de otras sustancias equivalentes.

Por otra parte, en presencia de aguas salobres ricas en sulfatos, el ataque bacteriano que provoca la formación de sulfuro de hierro, se puede contener aplicando, antes del revesti-

miento bituminoso, otro revestimiento de cemento.

Como se puede ver, las precauciones que hay que tomar para prevenir la corrosión, tanto exterior como interior, son muy parecidas.

El peligro de las corrientes erráticas, requiere otra protección catódica por medio de corrientes imprimidas y ánodos de sacrificio. Ello, naturalmente, en caso de tuberías eléctricamente continuas.

En caso de tuberías de fundición con juntas de goma, o en caso de amianto-cemento, dicho peligro no se presenta.

La presencia de aguas superficiales ricas en sales y en particular en sulfatos (más de 400 p.p.m.) hace que el cemento esté expuesto a fenómenos de corrosión y esto es el motivo por el que los proyectistas han impuesto la adopción del cemento sulfatorresistente (ASTM C1 50, clase V).

c) *Transporte y puesta en obra de la tubería.*

Aunque el transporte, almacenaje y puesta en obra de un conducto no constituyan de por sí un gran problema, todavía se consideró atentamente también esta serie de operaciones, puesto que los elementos de tubería son millares y millares, que se juntan para formar un conducto de 70 Km, y por tanto, todo problema, de coste como de tiempo, se multiplicaría millares de veces influyendo de manera esencial en los costes y tiempos de operación.

La complejidad y el número de operaciones requeridas por el transporte y la subsiguiente puesta en obra de un conducto tan largo, hacía posibles o más bien inevitables, algunas grietas en el estrato protector del cemento.

Puesto que los módulos de elasticidad de cemento, fundición o acero, son muy diferentes, hubiera sido indispensable manejar con gran cautela los tubos, puesto que algunas grietas podían escaparse de los controles en el taller de obra y también durante las pruebas de presión y manifestarse sólo después de algunos años de ejercicio del conducto.

Este peligro subsistía también para los tubos de amianto-cemento, pero los proyectistas opinaban que las eventuales grietas difícilmente pasarían desapercibidas, sobre todo después de las pruebas de presión efectuadas con la excavación abierta.

d) *Características mecánicas y de duración.*

Ya desde que se inició el proyecto, resultó evidente que las solicitaciones mecánicas debidas a la presión interior del agua no constituían un gran peligro en cuanto el perfil del conducto, relativamente aplastado, necesitaba una altura de bombeo algo limitada.

La presión de ejercicio normal es inferior de 10 atmósferas, mientras los accidentales au-

fácilmente también por tuberías de cemento-amianto de calidad mediana.

En condiciones normales, el período de vida de un conducto no constituye un problema, cualquiera que sea el material empleado. Los ejemplos son innumerables y está demostrado que la utilización de un conducto por muchas decenas de años no compromete en lo más mínimo la eficiencia del sistema, puesto que se llega al envejecimiento técnico antes que al físico.



mentos de presión debidos a posibles repentinos aumentos de presión; por ejemplo, golpes de ariete, no superan las 15 atmósferas.

Como se ve, en este campo, todos los materiales existentes en el mercado ofrecían suficiente seguridad.

Particular atención se puso en las eventuales cargas accidentales exteriores sobre un conducto de amianto-cemento enterrado cerca de una importante vía de comunicación.

Considerando una profundidad de unos 1,5 metros, es decir, la necesaria para un buen aislamiento térmico, se puede comprobar fácilmente cómo una carga de 5 toneladas por rueda (el peso de un camión pesado accidentalmente salido de carretera) puede ser soportada

En el caso de aguas agresivas, tanto exteriores como interiores, la vida del conducto puede, en cambio, reducirse drásticamente si no se adoptan las medidas de protección ya descritas.

e) *Coste.*

El factor coste en el mercado local (siempre teniendo en cuenta la importancia de la obra), resultó uno de los elementos que más influencia ejercieron en la elección del material a adoptar.

Las dificultades de abastecimiento y de transporte y las complicaciones de tipo aduanero influyen y hacen resaltar las diferencias de precio de los diversos materiales. La fundición

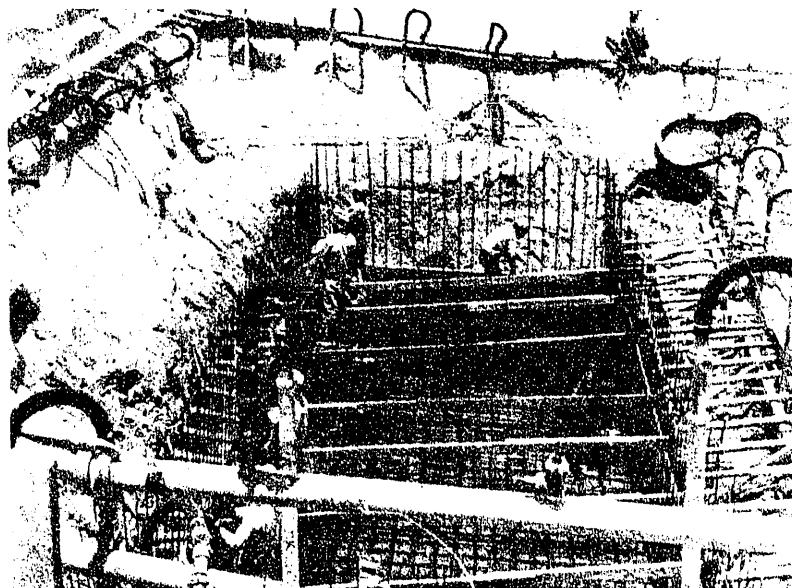
es más cara que el acero, pero la colocación de la tubería de fundición es mucho más barata, por no exigir soldaduras y requiere una menor especialización de la mano de obra, cuestión importantísima en estos países.

Si por un lado los diversos materiales son equivalentes desde el punto de vista técnico, en el mercado local el factor de precio hace desplazar la balanza en favor del amianto-cemento.

e imprevistas dificultades en la puesta en obra de la tubería.

La presencia de la capa superficial que afectaba más de la mitad del trazado, retardó los trabajos y obligó al constructor a comprar grandes cantidades de material para rebajar la capa durante las obras.

Además, en muchos puntos, inesperadamente, se encontró la roca, presente a veces en estratos coralinos de 10 cm de espesor; otras ve-



Preparación de las cimentaciones de hormigón armado para la central de bombeo del agua destilada.

En efecto, otro elemento en pro de la elección del amianto-cemento fue la apertura, en Dammam, de una fábrica que produce tubos de amianto-cemento según los procedimientos Eternit.

Por tanto, la adopción de este material estaba aconsejada también por razones sociales y porque de tal manera se eliminaban los trámites aduaneros y burocráticos, evitando la importación de una gran cantidad de material.

Para proteger las tuberías de la corrosión interior provocada por el agua destilada, los proyectistas decidieron aplicar un revestimiento interior de barniz protector, cuyo uso en contacto con sustancias alimenticias no sólo fuese posible, sino que, al mismo tiempo, presentara las necesarias características de resistencia a la agresividad del agua destilada.

La empresa, por su parte, encontró notables

ces, en cambio, en bancos imponentes que impusieron recurrir a los explosivos.

Los depósitos y las estaciones de mezclado.

Llevada por el conducto, el agua destilada llega a los centros de distribución y, en base a los criterios anteriormente expuestos, se mezcla con el agua de pozo para obtener la salinidad deseada para el consumo.

Con tal fin se han excavado pozos nuevos y modernos en los puntos en que los estudios hidrogeológicos efectuados en la zona durante años por los técnicos de Italconsult, señalaban la presencia de agua con un contenido de sales más bajo y en la cantidad deseada.

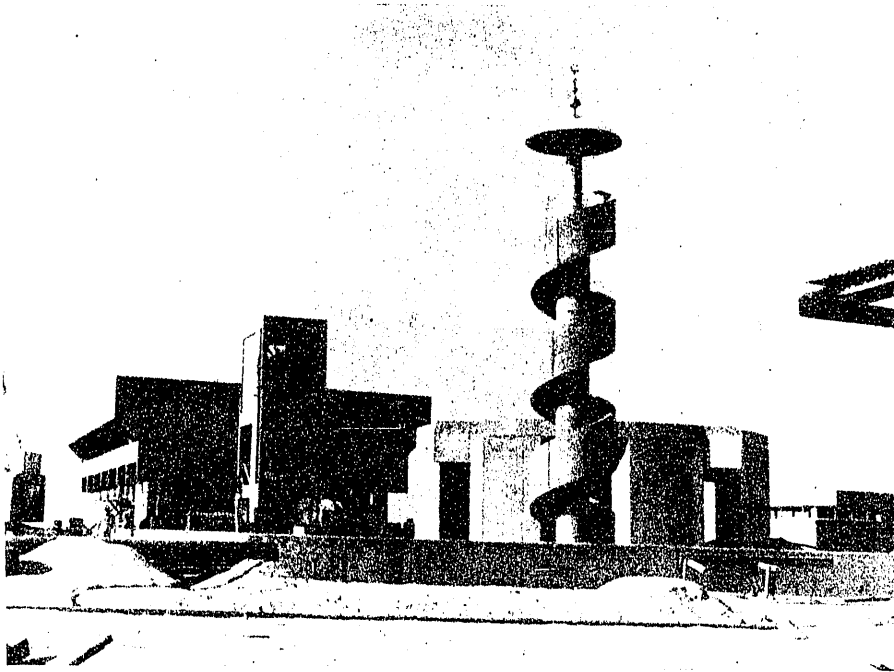
Desde los pozos, el agua salobre se bombea en tanques destinados a garantizar una reserva de agua, precisamente de pozo, suficiente para asegurar el abastecimiento por un período de

tiempo variable, según los casos, de doce a veinticuatro horas. De la misma manera el agua destilada procedente del conducto se almacena en tanques, también de hormigón armado, revestidos en el interior con barniz protector.

Se tiene de tal manera un sistema de doce tanques, así distribuidos:

- 1 tanque de 6.000 m³ de agua destilada.
- 1 tanque de 1.100 m³ de agua de pozo.
- 1 tanque de 3.300 m³ de agua potable.

rados e hidráulicamente conectados formando dos grupos diferentes. Esto no sólo para facilitar las operaciones de manutención y para permitir el llenado, también cuando en el departamento cercano se efectúen trabajos de limpieza o de manutención, sino, y sobre todo, para las fuertes dilataciones térmicas y porque la presencia en superficie de la capa freática y un terreno de cimentación poco consistente aconsejaba tener en cuenta posibles derrumbes diferenciados y, por consiguiente, imponía es-



El edificio de control y la mezquita.

Dammam.

- 1 tanque de 6.000 m³ de agua destilada.
- 1 tanque de 1.100 m³ de agua de pozo.
- 1 tanque de 3.500 m³ de agua potable.

Sayhat, Safwa y Qatif.

- 1 tanque de 1.100 m³ de agua destilada.
- 1 tanque de 500 m³ de agua de pozo.

Los tanques de 6.000 m³ están divididos, estructuralmente, en cuatro departamentos sepa-

estructuras con muchas juntas. Además, el tanque de 1.100 m³ se consideraba como un módulo componiendo los tanques mayores, y ello le permitió a la empresa utilizar las mismas cajas (de metal) en los diversos talleres adoptando una rigurosa programación de taller.

Desde los tanques, el agua de pozo y el agua destilada se mezclan en las proporciones establecidas a lo largo de la línea, por medio de un sistema analógico, mandado por un conductivímetro colocado en posición inferior respecto al punto de mezclado.