

## Evaluation and proposal for the rehabilitation of anaerobic prestressed concrete tank

**Rosa. E. Malavé, Alfredo J. Morón, Emilia Anzola, Carlos E. Mirabal, and Miguel Parra**

*Decanato de Ingeniería Civil Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado"  
Apdo. 400. Barquisimeto, Venezuela. Telf. 58-051-591260 al 71. Fax 58-051-591264  
E-mail: rmalave@delfos.ucla.edu.ve*

### Abstract

The aim of this study is to evaluate, diagnose and suggest how to repair an anaerobic prestressed concrete tank which showed cracking and spalling in the dome within a year of being put into service. Esclerometry, ultrasound of the concrete and potentials map of embedded steel tests were carried out in the dome. Chemical analysis and x-ray diffraction tests were conducted on the concrete covering. This was affected due to the considerable degree of permeability of the concrete. On the outside surface, acids in the atmosphere diminished the pH in the interface water contained in the concrete pores. On the inside surface, gas containing sulphide and carbon dioxide caused the same situation of the pH reduction in the concrete pores. The result of these was the progressive deterioration of the concrete and the reinforcement. Due to the advanced state of deterioration of the dome, two feasible repairing solutions were proposed : Demolition of the existing dome slab, Use of the existing structure as formwork for pouring a new concrete dome. The concrete mix should be prepared with Portland cement type V, low water cement ratio (0,4), minimum cement content of 400 kg/m<sup>3</sup>, and a polymer covering applied to the dome surface.

**Key words:** Concrete, anaerobic, deteriorate, corrosion, rehabilitation.

## Evaluación, diagnóstico y reparación de un tanque digester afectado por corrosión

### Resumen

El objetivo de este trabajo es hacer una evaluación, un diagnóstico y una propuesta de reparación de un tanque anaeróbico de concreto armado, el cual comenzó a evidenciar daños en la cúpula a un año de su puesta en servicio. Conocidas las condiciones se procedió a efectuar ensayos en la cúpula del digester: esclerometría, ultrasonido y mapeo de potenciales y en las muestras del concreto de recubrimiento: análisis químico y difracción de rayos x. Esto permitió diagnosticar las causas que originaron el deterioro las cuales pueden resumirse en: disminución del pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto, que por permeabilidad permitió el ingreso de los ácidos presentes en la atmósfera por la parte superior y del gas que contiene ácido sulfhídrico y dióxido de carbono por la parte inferior, afectando al concreto y posteriormente al refuerzo. Debido al estado de deterioro del domo se propone la reposición de la cúpula, según dos soluciones factibles: Demolición de la losa existente ó utilización de la misma como encofrado perdido. El concreto debe diseñarse con cemento Portland tipo V, tener una baja relación agua/cemento (0,4), un contenido de cemento mínimo de 400 kg/m<sup>3</sup> y colocar un recubrimiento superficial polimérico.

**Palabras clave:** Concreto, anaeróbico, deterioro, corrosión, rehabilitación.

## Introducción

Los especialistas Shupack et al. [1] y McCarthy et al. [2] quienes han reparado tanques similares a éste, indican que en la mayoría de los casos el deterioro en tanques de concretos pretensados, ocurre primeramente en el domo y en el anillo. En esas zonas, el concreto puede evidenciar variaciones en la proporción arena/cemento. Por lo tanto el deterioro se asocia con un recubrimiento insuficiente, materiales de baja calidad y preparación deficiente de la superficie antes de la colocación del concreto. En estas condiciones, el agua entra en contacto con el refuerzo por permeabilidad, favoreciendo la corrosión del mismo y la posterior delaminación del concreto.

Por otro lado, el deterioro por corrosión en tanques digestores anaeróbicos, puede ser similar a lo reportado por Tahadiro [3], respecto al ataque en tuberías de concreto que conducen aguas residuales, que se produce por la presencia de nutrientes, humedad, concentración de  $H_2$ , S, variaciones de pH y crecimiento de bacterias oxidantes de azufre. También, Heuer et al. [4] mencionan que en desagües que contienen compuestos sulfurados estos pueden ser transformados en ácido sulfhídrico y otros compuestos orgánicos sulfurados, por la reducción en condiciones anaeróbicas, luego el ácido sulfhídrico puede ser oxidado en presencia de agua y oxígeno. Este ácido ataca al concreto produciéndose yeso y estrigita, y en consecuencia se pone en peligro el acero de refuerzo. Con estos antecedentes y revisando las condiciones fisicoquímicas del tanque en estudio se tratará de presentar un diagnóstico al respecto.

## Parte Experimental

Con el propósito de hacer la evaluación del tanque digestor se utilizó la siguiente metodología: se analizó la influencia del ambiente, tanto externo como interno, se revisaron los planos del proyecto y se realizó una inspección visual para verificar el estado de la estructura. Una vez conocidas todas las condiciones, se procedió a efectuar ensayos que permitieran hacer un diagnóstico adecuado del problema y proponer soluciones al mismo. Estos ensayos fueron, en la cúpula del digestor, esclerometría y ultrasonido, y en muestras tomadas al concreto de recubrimiento,

análisis químico, difracción y fluorescencia de RX. Durante un año se efectuó un seguimiento del tanque digestor, realizando periódicamente medición de potenciales y análisis químico.

## Ambiente externo e interno

La planta de tratamiento tiene dos digestores I y II, el primero con seis años de construido, el segundo de reciente construcción y ambos con una capacidad de 9.000.000 l. Frente a estos digestores se encuentran unos tanques desulfuradores destapados, con aireamiento por agitación, por lo cual el ambiente externo es altamente agresivo.

Las aguas crudas provenientes de la destilería, que ingresan al digestor, tienen las características siguientes promedios: pH = 7, DQO = 20.000 ppm, sulfuros = 350 ppm, sulfatos = 7.000 ppm y sólidos disueltos = 23,2 g/l.

Los tanques digestores están encargados de realizar la estabilización de las sustancias orgánicas biodegradables contenidas en el efluente crudo por medio de la acción de bacterias anaeróbicas. De acuerdo a la información suministrada por la empresa, la caracterización del gas interior del digestor reporta la composición siguiente: 65% de metano ( $CH_4$ ), 34,7% de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), 0,3% de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y trazas de  $N_2$ , CO y  $H_2$ . Esto indica que en presencia de humedad la atmósfera interna también es ácida.

## Estructura del tanque digestor anaeróbico I

El tanque en estudio, es una estructura cilíndrica de concreto armado, con pared pretensada de altura 10,35 m y una cúpula de casquete esférico de altura 3,87 m y de radio 16 m, que termina en un anillo exterior.

De acuerdo a los planos suministrados, la cúpula tiene una retícula de refuerzo constituida por una doble malla formada con armadura de  $\phi$  1/8", en un sector comprendido desde el borde del anillo hasta 7 m. radiales, a partir de esta zona existe una malla simple de lecho inferior con armadura de  $\phi$  1/4". Ambas con separación de 20 cm (Figura 1-a).

El espesor de recubrimiento es muy bajo, ya que según los planos el espesor total es de 10 cm, lo cual indica un recubrimiento máximo

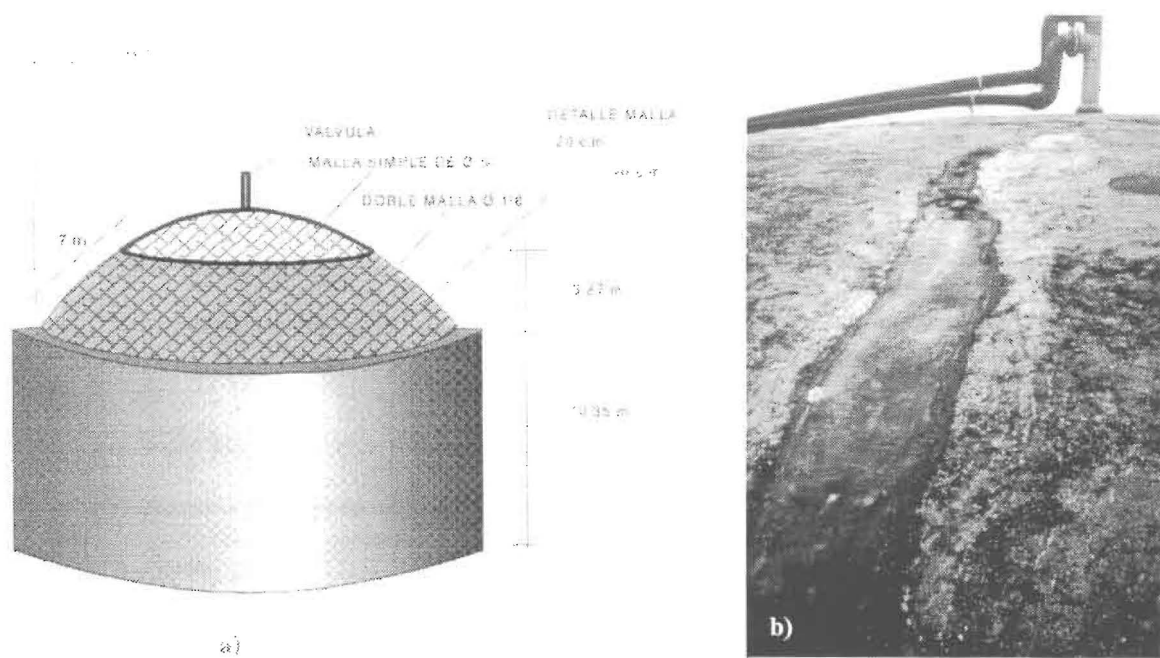


Figura 1. a) Dimensiones del tanque anaeróbico. b) Detalle de la degradación observada en el cemento.

de las mallas de 3 cm. La presión interna que ejerce el gas en la cúpula no fue tomada en cuenta en el proyecto estructural, lo cual ha contribuido al agrietamiento superficial sobre todo en el punto más alto. El tanque tiene una válvula de seguridad que se dispara cuando las presiones son superiores a 18" de agua.

En cuanto al concreto usado, se desconocen datos de relación agua/cemento, contenido de cemento, uso de aditivos y porosidad inicial. La única información conocida para el caso de la cúpula es la resistencia de diseño ( $210 \text{ kg/cm}^2$ ).

#### Inspección visual

Las paredes y el anillo de ambos tanques no presentan daños evidentes, observándose el concreto en buen estado. Los daños principales se presentan en el domo del tanque digestor I, especialmente en su punto más alto, donde se observan agrietamientos, desprendimiento del concreto, manchas de óxidos y la retícula de refuerzo descubierta en algunas zonas (Figura 1-b).

Con el propósito de realizar los ensayos de esclerometría, ultrasonido, mapeo de potenciales y caracterización química de la estructura, se dividió el tanque en cuatro zonas: zona 1, zona 2,

zona 3, zona 4, siguiendo los cuadrantes de una media esfera ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $360^\circ$ ) Cada cuadrante se dividió a su vez en cuatro partes arrojando 16 áreas de ensayos según la metodología propuesta por Shupack et al. [1] (Figura 2).

#### Ensayos de esclerometría y ultrasonido

Los ensayos de esclerometría se fundamentan en la estrecha relación que existe entre la dureza superficial y la resistencia a compresión, si la superficie del material no ha sufrido alteraciones. Para este caso se realizaron aplicaciones en 64 puntos, resultando una resistencia promedio en cada punto de cinco mediciones. El equipo utilizado fue un esclerómetro de rebote marca Control. Se partió del supuesto que la superficie se ha carbonatado homogéneamente, su resistencia superficial de hecho es más alta, se desea determinar si existe un gradiente de resistencia. Para realizar cada medición se limpió adecuadamente la superficie, tratando de obtener una superficie lisa.

El método ultrasónico de transmisión superficial [5], se utilizó en este estudio para conocer la uniformidad del concreto y delimitar zonas de baja calidad, ya que en este caso no se pudo determinar la resistencia, por la limitación que

impone la estructura al impedir usar la transmisión directa.

Para hacer las medidas se escogieron cuatro áreas (30cm x 30 cm): I, II, III, IV pertenecientes cada una de ellas a las zonas 1, 2, 3 y 4 previamente especificadas. En las zonas 1 y 2 se tomaron áreas agrietadas (I y II), y en las zonas 3 y 4 no agrietadas (III y IV). En cada caso se realizaron cinco mediciones (Figura 2 y 3).

**Carbonatación y mapeo de potenciales**

Se realizaron mensualmente cuatro mediciones de profundidad de carbonatación de la cúpula

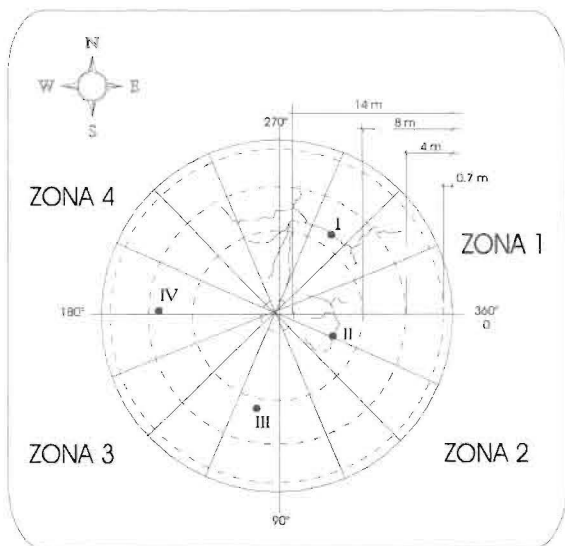


Figura 2. Plano de grietas de la cúpula y zonas usadas para los ensayos.

pula en cada una de las zonas, realizando pequeñas perforaciones mecánicas de máximo 1,5 cm y utilizando la fenolftaleína como indicador. También con esa misma periodicidad se midió el potencial electroquímico de la armadura embebida en el concreto en cinco puntos de las zonas indicadas, tomando como referencia un electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>, de acuerdo a la norma ASTM C 876. Para realizar estas medidas previamente se humedecía la superficie hasta saturación, debido a que el ambiente externo es muy húmedo y esto garantizaba condiciones similares en cada medición.

**Análisis químico del recubrimiento, fluorescencia y difracción de rayos x**

Se retiró parte del recubrimiento de cada una de las zonas afectadas. Estas muestras fueron trituradas, removido el agregado grueso y tamizadas por el tamiz #200, determinándose mediante análisis químico, contenido de sulfatos y cloruros. También a esas muestras se les realizó análisis de fluorescencia (EDAX) y difracción de rayos x (XRD) utilizando radiación Cu- $\alpha$ . La abundancia relativa de los minerales se estimó sobre la base de la intensidad de sus picos característicos. Este ensayo se realizó para determinar la presencia de azufre y yeso provenientes del ataque químico, y la fluorescencia de rayos x para observar la abundancia relativa del elemento azufre sobre calcio, silicio y aluminio elementos que forman aluminosilicatos cálcicos, normalmente presentes en el concreto.

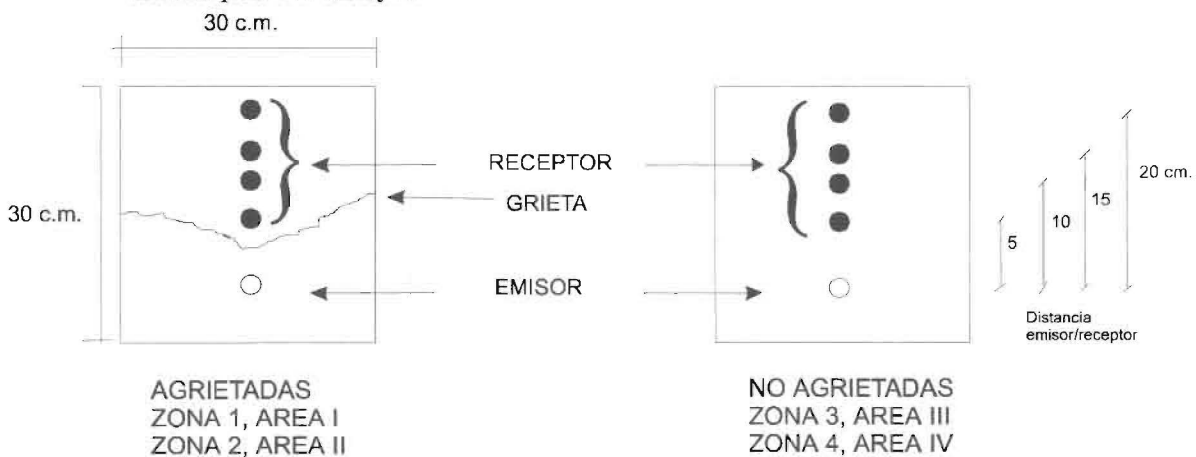


Figura 3. Detalle de las áreas del tanque usadas para los ensayos de ultrasonido.

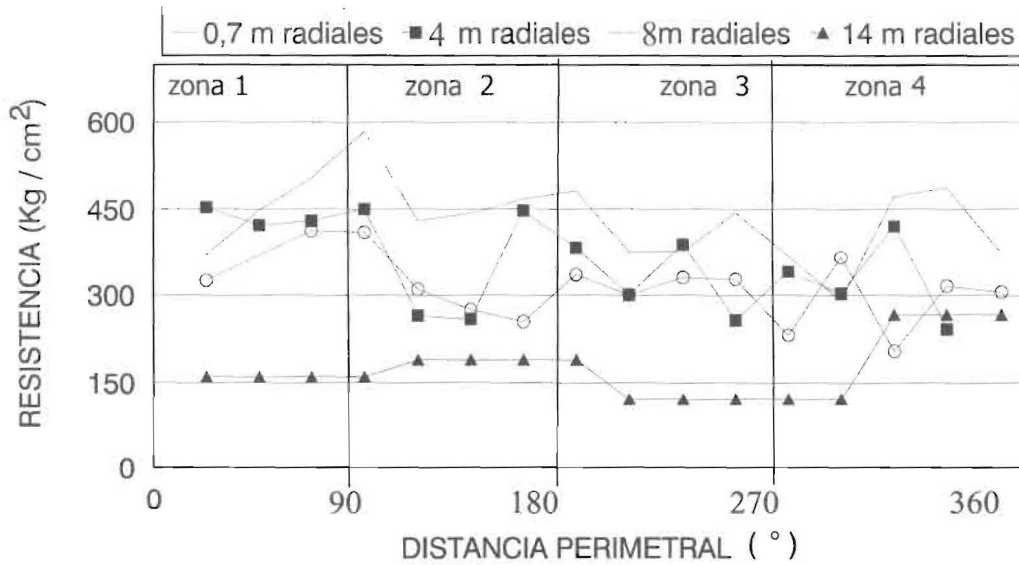


Figura 4. Esclerometría del domo del digestor.

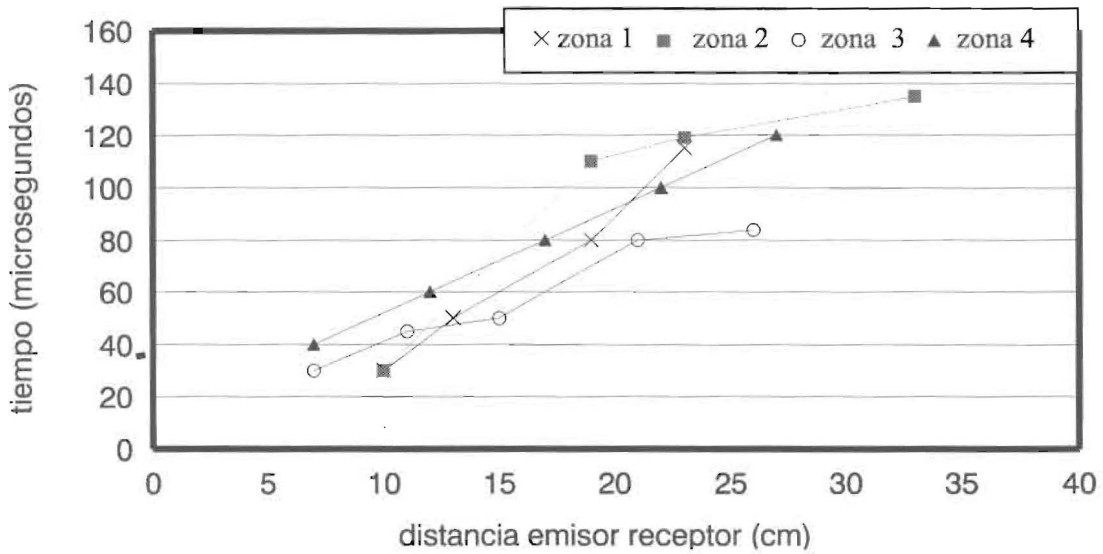


Figura 5. Ultrasonido superficial del domo.

## Resultados y Discusión

### Ultrasonido y esclerometría

Los ensayos de esclerometría y ultrasonido verificaron lo inferido por la inspección visual. De acuerdo a la esclerometría la zona más afectada corresponde a la parte superior de la cúpula, es decir a una distancia de la base comprendida entre los 14 m y el tope (Figura 4). La esclerometría reporta un gradiente de resistencias mecánicas que va disminuyendo a medida que se asciende en la cúpula. En la parte superior el concreto ha

perdido cohesión siendo la resistencia promedio de 150 kg/cm<sup>2</sup>, que está muy por debajo de la resistencia de diseño (210 kg/cm<sup>2</sup>), como se aprecia en la Figura 4 donde cada valor de resistencia corresponde al promedio de cinco mediciones.

Los resultados del ultrasonido se presentan en la Figura 5, en ese caso las respuestas de las ondas en las zonas 1 y 2 demuestran que el agrietamiento es profundo, ya que un concreto homogéneo y sin vacíos tiene un comportamiento como el presentado por la zona 4 donde la respuesta es lineal con la distancia, en la zona 3 ya comienza a

presentar variaciones, es decir, se evidencia formación de grietas.

### Medida de potenciales

La medición de potenciales se realizó en cinco puntos de cada zona, los resultados se presentan en la Figura 6. La zona 3 reportó al inicio del experimento los valores menos negativos de potencial, que corresponden a valores pasivos. Sin embargo al transcurrir la evaluación los potenciales de todas las zonas se ubicaron en valores inferiores a -300 mV. Aun cuando la zona 4 no ha reportado pérdida en las resistencias mecánicas los valores de potencial corresponden a actividad de corrosión.

### Análisis químico, fluorescencia y difracción de rayos x

En la determinación de sulfatos y cloruros presentes en el recubrimiento, los cloruros están dentro de los rangos aceptables (menores de 0,2%). Las determinaciones de los sulfatos reportaron valores muy por encima de los que introduce el cemento (0,46% por peso de concreto). En la **zona 1** 10,7%, en la **zona 2** 12,9%, en la **zona 3** 0,89% y en la **zona 4** 0,97%, todos por peso de muestra de concreto.

De acuerdo a los ensayos mecánicos realizados, al mapeo de potenciales y a los resultados de contenido de sulfatos observados en el recubrimiento de la cúpula, se infiere que el ataque producido tiene su origen en el sulfídrico presente en el ambiente, por lo tanto se efectuó un análisis mineralógico de muestras tomadas de las cuatro zonas, realizando el análisis en polvos y en material superficial compacto. El ataque al concreto de recubrimiento por este efecto, de acuerdo a Tadahirol et al. [2] y Mehta et al. [6], produce yeso, calcita, estringita y barita, observándose también expansión, agrietamiento y desintegración. En este caso los signos visibles mencionados se observan especialmente en las zonas 1 y 2, específicamente en el punto superior, en donde fueron retiradas las muestras.

Según los análisis de rayos x de las muestras compactas (Figura 7), las zonas 1, 2 y 3 muestran la presencia de azufre en los tres casos, siendo mayor la presencia en la zona 3. También se evidencia la presencia de pequeñas formaciones de yeso en las muestras correspondientes a las zonas 2 y 3. En la zona 1, a pesar de ser la de mayor agrietamientos no se evidencia la presencia de yeso. La calcita se presenta en las tres zonas, siendo mayoritaria en la zona 1 que reporta muy poco azufre y no reporta yeso.

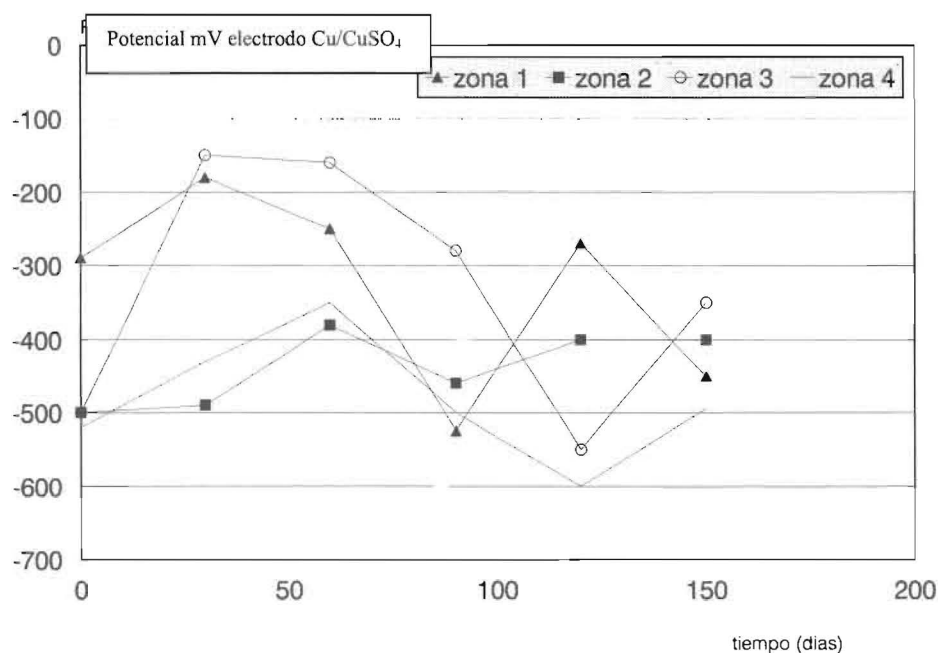


Figura 6. Medición de los potenciales de la malla metálica de la cúpula.

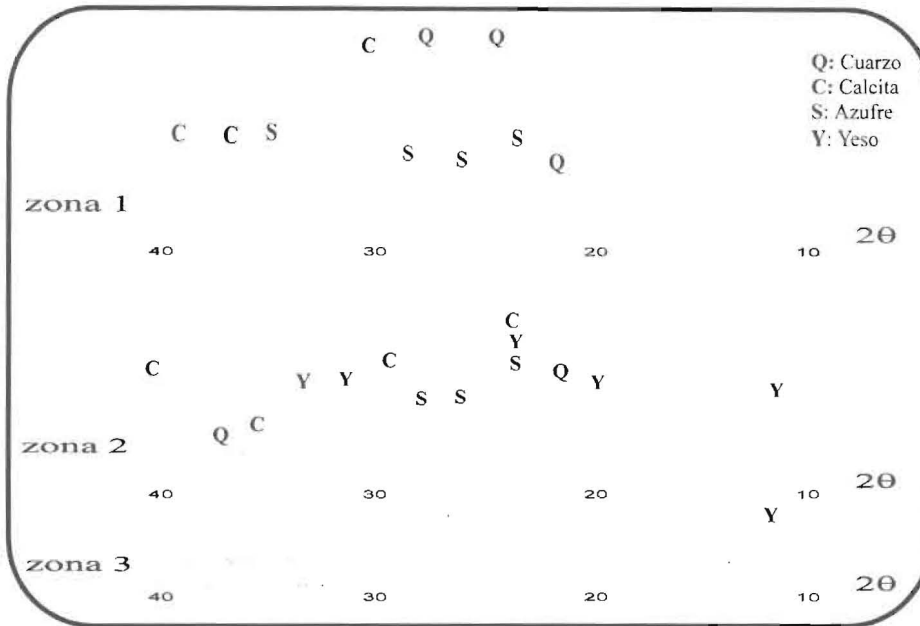


Figura 7. Difractograma de rayos x de las muestras de concreto compactas del digestor.

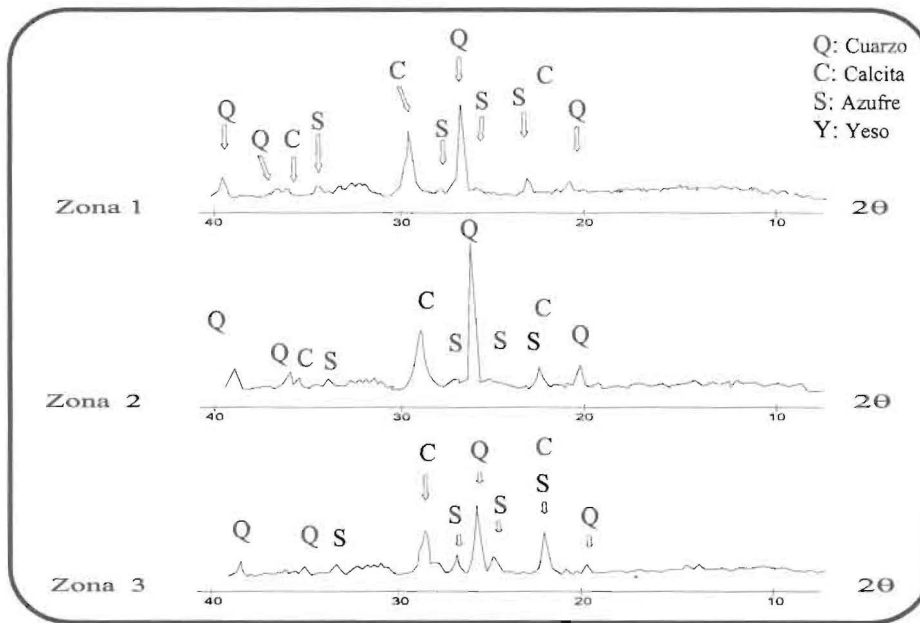


Figura 8. Difractograma de rayos x de las muestras de concreto en polvo del digestor.

Las zonas 1, 2 y 3 reportaron calcita y azufre, ninguna evidenció la presencia de yeso al realizarles los análisis de rayos x a las muestras en polvo, es decir, a mayor profundidad de recubrimiento (Figura 8).

Con la fluorescencia las señales de Ca y S fuertes verifican la formación de yeso (Figura 9),

pero según los rayos x hay más cantidad de azufre que de yeso. De acuerdo a esta observación, en todos los casos la calcita demuestra la carbonatación, también se evidencia que se ha comenzado a formar el yeso superficialmente, lo cual ocurre a pH menores a 3, verificándose puntualmente, pero a mayor profundidad no se ha formado ni yeso ni estringita (Figura 8). El deterioro se

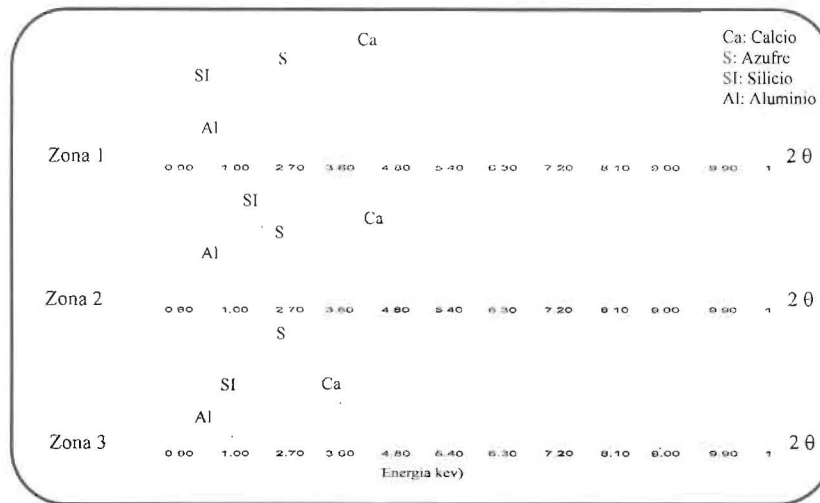


Figura 9. Fluorescencia de muestras del recubrimiento del tanque.

manifiesta con descascaramiento, untuosidad superficial y disgregación. El ataque a las estructuras metálicas es posterior iniciándose el proceso de corrosión de la armadura.

De acuerdo a los ensayos, las causas que originaron el deterioro, son básicamente de origen químico, unido al uso de un concreto de baja calidad para este ambiente, a deficiencias en el diseño y a detalles constructivos de la cúpula. De tal manera que el proceso de deterioro puede describirse así:

Disminución del pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto que debido a su alta permeabilidad permitió el ingreso de los ácidos presentes en la atmósfera, por la parte superior de la cúpula y del gas que contiene ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, por la parte inferior de la misma, los cuales afectaron inicialmente al concreto y posteriormente al refuerzo.

El gas sulfhídrico seco no es peligroso, pero como en un volumen de agua pueden disolverse hasta 45 volúmenes de gas [7], la disolución ataca la masa del concreto, por lo tanto cantidades insignificantes de sulfhídrico pueden llegar a ser peligrosas por la formación de azufre que se deposita y ataca al concreto al transformarse en ácido sulfúrico, estringita o yeso. De acuerdo a esto se infieren como reacciones en la atmósfera externa las siguientes:

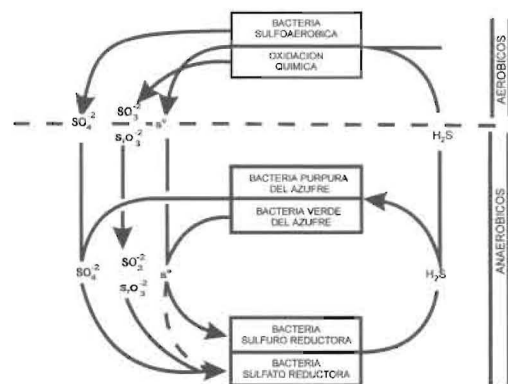
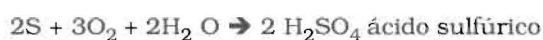
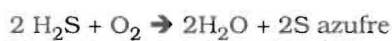
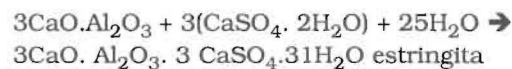


Figura 10. Ciclo natural del azufre [4].



Como se conoce la destrucción del concreto se produce porque los ácidos que lo atacan, forman sales solubles con el  $Ca(OH)_2$  las cuales son arrastradas por el agua. La acción del ácido sulfúrico destruye el concreto con mayor rapidez pues además de la acción agresiva del  $H^+$  hay que sumar la acción específica del ion sulfato [8]. En condiciones anaeróbicas el proceso es distinto y es el que debe suceder en el interior del tanque, el ion sulfato se reduce a sulfuro [4] e inmediatamente forma ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), el cual ataca la parte inferior de la cúpula (Figura 10).



El factor físico que favoreció la acción química fue el bajo recubrimiento y la falta de doble malla en la parte superior de la cúpula que la hicieron más sensible a agrietarse por la presión interna ejercida por el gas.

### Conclusiones

De acuerdo a la evaluación realizada, las causas del deterioro de la cúpula se deben a deficiencias en el diseño y al uso de un concreto inadecuado para el ambiente, de manera que los ácidos sulfúrico (externamente/mayor daño) y sulfídrico (internamente) atacaron al concreto y posteriormente a la armadura produciendo, pérdida de cohesión, corrosión y disminución de la resistencia mecánica.

En consecuencia, debido al deterioro de la cúpula y en virtud de que las paredes y el anillo no reportan ningún daño, se propone la reparación según dos soluciones factibles:

- a) Demolición de la losa existente y construcción de una nueva; o
- b) Utilización de la losa existente como encofrado perdido y sobrevaciado.

En ambos casos el concreto deberá diseñarse con cemento resistente al ataque de sulfatos, preferiblemente Portland tipo V, tener una baja relación agua cemento ( $< 0,4$ ) y un contenido de cemento mínimo de  $400 \text{ kg/m}^3$ .

En caso de utilizar la losa como encofrado perdido, su superficie debe prepararse adecuadamente saturándola con agua, sin chorreado, de manera que exista una mejor adherencia entre el sistema viejo y el nuevo. Sin embargo, deben colocarse tacos aislantes, de plástico o de concreto, entre la armadura vieja y la nueva que garanticen un aislamiento eléctrico, evitando así que se produzca nuevamente celdas activas de corrosión. Una vez concluido el proceso, se recomienda colocar un recubrimiento externo polimérico, por ejemplo poliuretano u otro tratamiento superficial que evite el deterioro del concreto en un ambiente ácido.

### Agradecimiento

Se agradece al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado y a la empresa Licorerías Unidas, Sociedad Anónima (LUSA) por el financiamiento y apoyo técnico de esta investigación.

### Referencias Bibliográficas

1. Shupack, M., Poston R. "Durability of prestressed tanks" *Concrete International Design and Construction ACI*, 11 (10) (1989): 51-55.
2. Mc.Carthy, D., Poston R., Shupack, M. "Repair of wire-wound prestressed concrete tanks" *Concrete International Design and Construction ACI*, 14 (3) (1992): 31-36.
3. Tadahiro Mori, Tsuguhiro Nonaka et al. "Interaction of Nutrients, Moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. Waer Researchs, Vol. 26 N° 1 pp 29-37 (1992).
4. J.J.M.B. Heuer and H.J. Kaskens "Prevention of Concrete Corrosion and odour annoyance with biofiltration". *Water Science Technology* Vol. 27, N° 5-6, pp 207-218, (1993).
5. Andrade, C. "Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras". Instituto Eduardo Torroja, España (1988) pp 62-63.
6. Mehta. "Discussion of the paper Combating Sulfate attack in corps of Engineers Concrete Construction" *Journal of the American Concrete*. April 1976 pp 237-238.
7. Biczok, Imre, *Concrete Corrosion; Concrete Protection* 5th edition, Chemical Publishing Co., New York, 1967.
8. Cohen, M. D. and Mather, B. Sulphate Attack on Concrete-Research Need, *ACI Materials Journal*, 88, Jan-Feb (1991): 62-69.

Recibido el 19 de Enero de 1998

En forma revisada el 14 de Septiembre de 1998