



Revista de la Asociación Latinoamericana  
de Control de Calidad, Patología y  
Recuperación de la Construcción

E-ISSN: 2007-6835

revistaalconpat@gmail.com

Asociación Latinoamericana de Control  
de Calidad, Patología y Recuperación de

Dikdan, M.Y.; de Corrales, R. M.; Avon, D.

Diagnóstico patológico y propuesta de intervención de los cimientos y de los muros de contención de derrames de dos tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico para usos industriales

Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, vol. 3, núm. 3, septiembre-diciembre, 2013, pp. 181-191

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, A. C.  
Mérida, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639593004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



# Revista ALCONPAT

[http://www.mda.cinvestav.mx/revista\\_alconpat](http://www.mda.cinvestav.mx/revista_alconpat)

eISSN 2007-6835



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

## Diagnóstico patológico y propuesta de intervención de los cimientos y de los muros de contención de derrames de dos tanques de almacenamiento de ácido sulfúrico para usos industriales

M.Y. Dikdan<sup>1</sup>, R. M. de Corrales<sup>1</sup>, D. Avon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Decanato de Ingeniería Civil, e-mail: [mydikdan@ucla.edu.ve](mailto:mydikdan@ucla.edu.ve), [rmalave@ucla.edu.ve](mailto:rmalave@ucla.edu.ve), [davon@ucla.edu.ve](mailto:davon@ucla.edu.ve)

### Información del artículo

Artículo recibido el 20 de Agosto de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 13 de Septiembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2014.

© 2013 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 3, Septiembre - Diciembre 2013, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, International, A.C., Av. Zamá No. 295 entre 61 y 63, Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista). Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamá No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de última modificación: 30 de Diciembre de 2013.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

## RESUMEN

En los muros y la losa de piso de una piscina de contención de derrames de tanques metálicos de ácido sulfúrico se evidenciaron sintomatologías de fallas. Se observó desagregación en las bases de los tanques y en la losa de piso. En la parte inferior de los muros se evidenció pérdida de conexión con la losa de piso. Mediante la extracción de núcleos al concreto se determinó: carbonatación, porosidad, penetración de sulfatos y resistencia a compresión. Al acero se le midió: espesor de recubrimiento, diámetro, potenciales y velocidad de corrosión. Se determinó la capacidad remanente del muro mediante cálculo estructural. Como conclusión la estructura se apreció muy afectada. Se recomienda el diseño especial de concreto con revestimiento antiácido y dos acciones, una inmediata mediante la construcción de tacos que garanticen apoyo y estabilidad a los tanques, y otra definitiva, reubicación del sistema de los tanques y la piscina.

**Palabras clave:** Tanques, Ácido sulfúrico, Desagregación, Corrosión, Muros.

## ABSTRACT

In an industrial facility, several failure symptoms were found on walls, floor slab, and foundations of concrete tanks designed to contain eventual spilling from two metallic containers of sulfur acid (one at 11% concentration, and the other at 98%). Loss of connection between lateral walls and floor slab was observed. Interior wall areas and foundations of tanks were covered with epoxy material which was mostly peeled off. By extraction of concrete nucleus samples, the following parameters were determined: carbonation, porosity, sulfate penetration, and compressive strength. Reinforcing bars were tested for: concrete cover thickness, diameter, potential measurements ( $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ ), and corrosion rate. Remaining structural capacity of concrete walls was calculated, concluding that the structure is severely affected by sulfur acid. Two actions are suggested: a provisional one by constructing big reinforced concrete cubes around the tank to make it stable; the other, a final solution, replacing the sulfur acid containers and the concrete tank for possible sulfur infiltration to the ground underneath them.

**Key words:** Tanks, Sulfur acid, disaggregation, corrosion, walls,

Autor de contacto: Y. Dikdan

## 1. INTRODUCCIÓN

La instalación industrial objeto de estudio tiene un área de tratamiento con ácidos, la cual cuenta con dos tanques metálicos de ácido sulfúrico diluido al 11% y al 98% respectivamente, ubicados en una piscina de concreto armado para contención de derrames. Los muros, la losa de piso y las bases de apoyo de los dos tanques evidenciaron sintomatologías de fallas, que indujeron a una evaluación y propuesta de intervención.

Al momento del estudio, la estructura tenía 15 años de uso. Los muros de contención de la piscina contenedora han sido intervenidos en años anteriores, se desconoce fecha exacta pero se estima que fue hace aproximadamente 6 años, esa intervención contempló el aumento del alto de los muros de 65,3 cm a 157 cm, además del revestimiento interior con un Epoxi (se desconocen datos del mismo), no se cuenta con información técnica acerca del armado e interconexión entre el muro existente y el nuevo colocado para aumentar el alto, ni características de diseño del concreto colocado.

A pesar del mantenimiento correctivo mencionado, se comenzaron a evidenciar sintomatologías de fallas que requirieron la realización de un estudio de diagnóstico y el proyecto de intervención, del cual se derivó este trabajo, a fin de evitar condición de vulnerabilidad para los trabajadores de la planta.

Cabe destacar que el concreto armado, por su característica alcalina, es un material muy inestable frente al ataque por ácidos, en especial al ácido sulfúrico y no resiste su exposición a altas concentraciones (98%), por lo tanto para construir un concreto durable en estos ambientes siempre se debe considerar unas condiciones específicas de diseño de mezcla, entre otras de baja relación agua/ cemento y un revestimiento externo que lo proteja, (ejemplo de epoxi o de poliuretano). Hay dos reacciones importantes entre los componentes del concreto y el ácido sulfúrico, que se deben mencionar con prioridad en razón de los daños que provocan:

En primer lugar, el ácido sulfúrico ataca los componentes hidratados comenzando por la cal, produciendo iones de calcio solubles que se arrastran por deslavado y se evidencia un aumento de porosidad en el material, generando así el proceso de deterioro que se pone de manifiesto por una destrucción desde la superficie hacia el interior. La destrucción es tanto más rápida cuanto más alta es la relación agua – cemento del concreto. La pasta de cemento así como la mayor parte de los agregados son atacados por los ácidos.

El segundo ataque proviene de los sulfatos del ácido, se basa en la formación de etringita:  $(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ , luego de la reacción del aluminato tricálcico del cemento ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) con el agua cargada de iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Los daños se manifiestan por un hinchamiento y una destrucción lenta de la superficie del concreto o bien, si la reacción se produce en profundidad, por una verdadera ruptura del concreto.

Para el caso en estudio, una vez realizada la inspección preliminar, se confirmó plenamente como agente agresor al ácido sulfúrico. Por lo tanto, se investigaron algunos datos generales y específicos de la estructura para cumplir con los requerimientos de la empresa contratante, esto es el diagnóstico patológico y la propuesta de intervención.

## 2. DESARROLLO

### 2.1 Diagnóstico Patológico.

Se desarrolló en dos etapas: una primera denominada Inspección Preliminar, que consistió en una visita de reconocimiento a fin de realizar la planificación del trabajo. Una segunda etapa, denominada Inspección Detallada, en donde, con base a la información recopilada, se hizo un registro fotográfico y de daños de todos los elementos que componen la estructura. Se seleccionaron el lugar, número de ensayos y mediciones necesarias para la caracterización de las fallas y los materiales componentes de la estructura, siguiendo los esquemas programados en la primera etapa, según se especifica en el Manual de DURAR (1998). Con este diagnóstico se hizo un levantamiento de los daños, (Figura 1). Identificándose las condiciones de los elementos estructurales y con base a ello se determinó la propuesta de intervención con fines de rehabilitación.

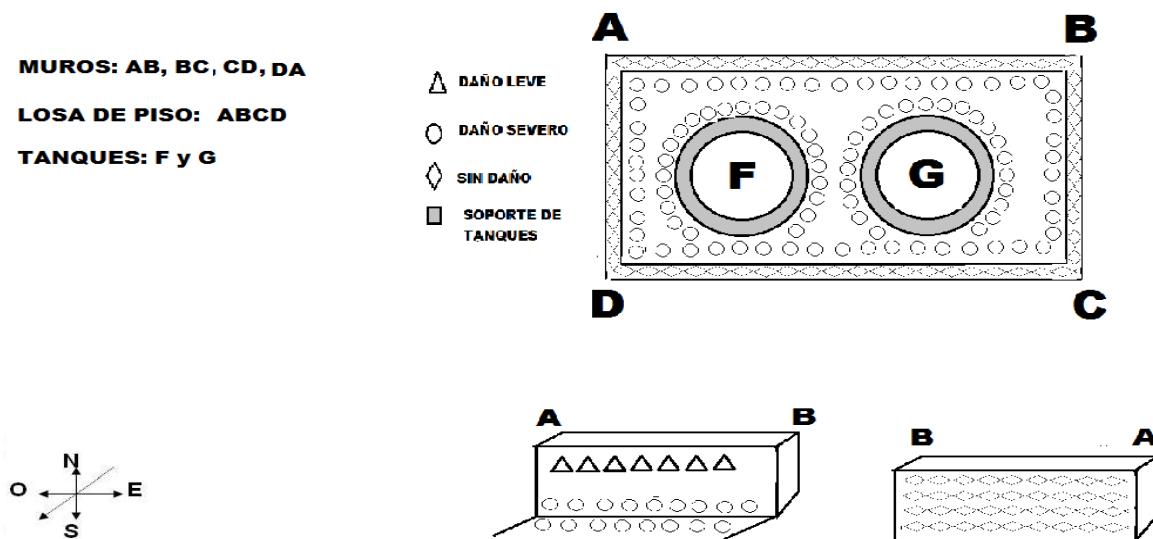


Figura 1. Levantamiento de daños de la estructura: Muros, Losa de piso y base de tanques.

En la parte inferior interna de los muros de contención AB, BC, CD, DA y en las bases de los tanques se detectó la presencia de irregularidades y desagregaciones que dejan al descubierto la armadura, de lo cual se puede inferir la condición de vulnerabilidad del concreto, lo que facilitó el deterioro prematuro del material como consecuencia del desprendimiento del revestimiento epóxico. La pérdida de material cementante en el concreto de la base de los 2 tanques de ácido sulfúrico, de la losa de piso ABCD y de la parte inferior interna de los muros, evidencia el deterioro acelerado de concreto, se ha perdido cohesión de los agregados. La parte externa de los muros, no evidenció daños, salvo en la unión entre la losa de piso y el muro donde existía sangrado.

Se hicieron ensayos destructivos y no destructivos. Mediante la extracción de núcleos al concreto se determinó: carbonatación, porosidad, penetración de sulfatos y resistencia a compresión. Para la extracción de los núcleos, se consideró una separación del acero en los muros de 20 cm, por lo tanto se extrajeron 3 núcleos de 4 pulgadas de diámetro, en la parte superior, media e inferior de los muros AB, DC ya que todos los muros son del mismo tipo de concreto.

Al acero se le realizaron ensayos de: localización y profundidad de la armadura, para la realización del ensayo se utilizó el Pachometro Marca JAMES INSTRUMENTS INC, MODELO

C-4974. Caracterización visual (espesor de recubrimiento, diámetro). Medición de potenciales(Cu/SO<sub>4</sub>Cu) mediante la utilización de electrodos de referencia y voltímetros de alta impedancia y velocidad de corrosión, mediante la utilización de Corrosímetro digital, para medir la resistencia a la polarización (equipo: Gecor 8). Finalmente, se determinó la capacidad remanente del muro mediante cálculo estructural.

### 3. RESULTADOS DEL DIAGNOSTICO

#### 3.1. Análisis químico y correlación con ensayos físico mecánicos.

En la inspección visual se observó desagregación y pérdida de material cementante en el concreto base de los dos tanques de ácido sulfúrico, y en la losa de piso de la piscina contenedora de derrames, esta condición imposibilitó la extracción de núcleos en la base de los tanques y losa, y hace suponer la penetración del ácido sulfúrico hacia el terreno soporte (Figura 2).

En los muros laterales, (Figura 3), se observó el concreto sin desagregación y compacto en la parte superior, sin embargo en la parte inferior, en la unión losa de piso/muro, manifiesta pérdida de conexión con la losa de piso y en esa zona lagrimeo por la cara exterior del muro. El aspecto compacto del concreto en la parte superior de los muros que conforman la piscina contenedora de derrames permitió que se trajeran tres núcleos. Tanto del concreto desagregado de la losa de piso de los tanques como de los tres núcleos extraídos en el muro, se tomaron muestras para determinar el contenido de sulfatos, los resultados se sintetizan en la Tabla 1.

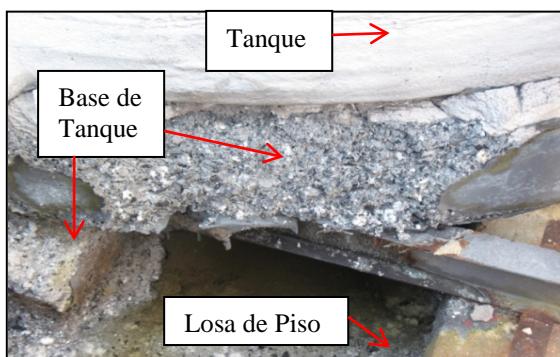


Figura 2. Concreto base de los tanques

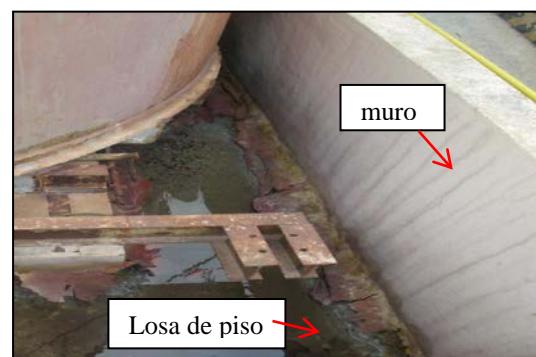


Figura 3. Muros y losa de piso de piscina

Tabla 1. Resultados de los ensayos químicos, físicos y electroquímicos

Muestra	Contenido de SO <sub>4</sub> %	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>	Porosidad Real %	Velocidad de Corrosión (μA/cm <sup>2</sup> ) promedio	Potencial Eléctrico (MV) promedio
Losa de Piso	10,63	**	**	**	**
Núcleo 1	0,81	156	21,01	0,176	-271,4
Núcleo 2	0,78	D	18,57	0,045	-205,5
Núcleo 2'	0,49	**	**	**	**
Núcleo 3	0,88	217	16,21	**	-65
Promedio 1-3	0,82	187	18,60		

\*\* No Aplica D= descartado por poseer acero de refuerzo transversal

Analizando esos resultados se puede observar el alto porcentaje de sulfatos reportado en la losa de piso de los tanques: 10,63% (siendo el máximo contenido aceptado 0,46% para un concreto de densidad 2,3 g/cm<sup>3</sup> con 350 kg de cemento/m<sup>3</sup> y 3% de yeso, Feliu y Andrade, (1989). De igual manera, se observa la penetración del ácido en los núcleos del muro (muestras 1, 2 y 3) en donde el porcentaje promedio de sulfatos es de 0,82%, contenido que casi duplica el máximo valor aceptado 0,46%. Es bueno destacar que por la ubicación de los núcleos extraídos (Parte superior del muro), esta zona nunca fue mojada por el ácido drenado de los tanques, por tanto los sulfatos reportados provienen de la atmósfera que rodea ese microclima. Las muestras 1, 2 y 3 fueron tomadas de la parte de los cilindros que corresponden al lado exterior del muro, la muestra 2' corresponde al cilindro 2 pero de la parte interior del Muro, (Figuras 4 y 5).

Los resultados químicos analizados también se corresponden con la resistencia mecánica  $R_{cc,media}=187 \text{ kgf/cm}^2$  y con la porosidad real promedio reportada en la Tabla 1 de 18,60%, lo cual se encuentra 8.6% por encima de la porosidad máxima recomendada para un concreto bueno y 3.6% por encima de un concreto durable.



Figura 4. Zona de extracción de la muestra 2' (Interior)



Figura 5. Zona de extracción de la muestra 2 (Exterior)

Al realizar la prueba de Carbonatación para conocer el cambio del pH del concreto y la profundidad de neutralización del mismo y correlacionar con el ingreso del ácido, se pudo observar que los muros están carbonatados en 1.5 cm en la parte exterior, sin embargo la parte superior interna no arrojó carbonatación y por ende pérdida de alcalinidad. Este resultado indica que el recubrimiento interior del muro, (epóxico), protegió del ataque del ácido y por ende de la pérdida de alcalinidad y que el ingreso del ácido se ha producido desde la parte externa del muro, como lo demuestra el valor de la muestra 2 cuyo porcentaje de sulfato es de 0,7764 % (cara externa del Núcleo) en contraposición con el valor de la muestra 2' cuyo porcentaje de sulfato es de 0,4975 % (cara interna del Núcleo).

Con respecto a la velocidad de corrosión y el potencial eléctrico en los muros, resumidos en la Tabla 1, se tiene como promedio de nueve puntos medidos para cada muestra, que de acuerdo a los resultados evaluados en las muestras 1, 2 y 3, la corrosión en el acero aún no está activada. En las muestras 1 y 2 la velocidad está por debajo de 0,1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , que de acuerdo al Manual DURAR (1998), indica corrosión despreciable. Tan solo el punto 1 de potencial da resultados de incertidumbre -274 mV, que indica una corrosión en el acero de 50%, pero este valor no se corresponde con el de velocidad. Sin embargo hay que recordar que el ataque de ácidos y de

sulfatos, como es este ambiente específico, produce una acción directa a la matriz de concreto, como se observó en la inspección visual de las bases de los tanques y en la losa de piso.

### 3.2. Condición del acero de refuerzo.

Se pudo determinar que el diámetro del acero de refuerzo de la parte superior del muro es de  $\varnothing 5/8"$  y el espesor de recubrimiento del acero es de 2.5 cm. La condición del acero de refuerzo de la losa de piso, base de los tanques y el ubicado en la parte inferior de los muros, evidencia corrosión y rotura al perder la sección por efecto del ácido al que ha estado expuesto durante meses, (Figura 6 y Figura 7). La condición del acero de refuerzo en la parte superior del muro esta conservado.



Figura 6. Acero de refuerzo expuesto en bases de tanques de Ácido Sulfúrico



Figura 7. Pérdida de sección y rotura del acero de refuerzo en base de los muros de contención

### 3.3. Verificación de la Resistencia Estructural Remanente de los muros de la piscina contenedora.

Con base a las condiciones críticas de desconexión de los aceros de la cara interior del muro, se determina la capacidad remanente considerando que el acero de la otra cara del muro actúa a tracción, mientras que en el extremo externo se concentra la compresión en el concreto. Dado que el recubrimiento es de 2,5cm, y el acero de refuerzo es de  $5/8"$ , resulta una altura útil disponible de 3,3 cm. Parece obvio que se trata de una sección sobrereforzada por lo que se espera que la falla ocurra por aplastamiento del concreto antes de que ocurra la fluencia en el acero, ergo, se realiza un análisis de compatibilidad de deformaciones considerando un  $\varepsilon_c=0.003$  como se

observa en la Figura 8 y un análisis de equilibrio de fuerzas en la sección considerando los siguientes parámetros:

$$f_c = 187 \text{ kgf/cm}^2 \quad (1)$$

$$A_s = 9.9 \text{ cm}^2 \text{ (se considera } \phi = 5/8 \text{ "c/20cm)} \quad (2)$$

$$b = 100 \text{ cm} \text{ (anchura unitaria del muro)} \quad (3)$$

$$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (Módulo elástico del acero).} \quad (4)$$

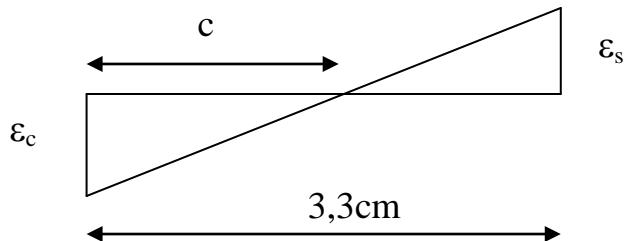


Figura 8. Diagrama de deformaciones de la sección.

Del sistema de ecuaciones consiguiente se obtuvieron los siguientes resultados:

$$c = 2.36 \text{ cm}, f_s = 3220 \text{ kgf/cm}^2 \text{ y } M_R = 675 \text{ kgfcm}$$

El momento actuante debido a la presión hidrostática del ácido sulfúrico, considerando un peso específico medio  $\gamma_{ac} = 1840 \text{ kgf/m}^3$  es el siguiente:

$$M_{act} = \frac{1}{2} \times 1840 \times h^2, \text{ en la que } h \text{ es la altura del líquido.}$$

Al igualar el momento actuante con el resistente, podemos determinar la altura máxima del líquido antes de que ocurra un colapso, resultando dicho valor en  $h = 0,85 \text{ cm}$ .

En las condiciones actuales, bajo el escenario de la ocurrencia de un derrame del tanque R3305 cuyas características son:  $\varnothing = 4.3 \text{ m}$ ,  $h = 5.1 \text{ m}$ ,  $h_{llenado} = 4.7 \text{ m}$  y capacidad: 140 Ton, (aproximadamente 75.640 litros), la altura del líquido necesitaría llegar a una altura de 1,30m, lo cual excede el máximo valor tolerable, ergo, ocurriría el colapso de los muros y el consecuente derrame del ácido sulfúrico hacia las áreas circunvecinas. Cabe recordar que el ácido sulfúrico concentrado puede atacar las paredes de fibra de vidrio de los otros tanques, lo cual agravaría la situación. Es necesario aclarar que se estimó el valor del empuje del ácido considerando un derrame lento (condiciones cuasiestáticas) por lo que de ocurrir un derrame súbito, las condiciones podrían ser más desfavorables.

**3.3.1. Condiciones estructurales de las bases de los tanques.** Como se pudo observar en sitio, las condiciones de la losa de fundación de los tanques que se encuentra a la vista, presenta un grave deterioro, siendo prácticamente imposible observar su estado bajo los muretes-pedestales. Bajo este escenario, se presenta un análisis de cota superior de presión sobre la fundación bajo condiciones estáticas suponiendo que sólo apoyan sobre el suelo los muretes/pedestal.

Para el tanque de ácido concentrado se tienen los siguientes datos:

- Peso propio del tanque de acero al carbono:  $W_{tan} = 38000\text{kgf}$  (estimado con base a un espesor de 1"en las láminas de acero que forman las paredes, piso y techo del mismo)
- Peso del ácido sulfúrico:  $W_{acido} = 140000\text{kgf}$
- Área de los muretes-pedestales:  $A_{ped} = 3*1.4834\text{m}^2 = 4.75\text{m}^2$
- Peso de los muretes-pedestales:  $W_{ped} = 4.75 \times 0.6 \times 2400\text{kgf} = 6840\text{kgf}$
- Peso total del sistema:  $W_{tot} = 38000 + 140000 + 6840 = 184840\text{kgf}$
- Presión de contacto:  $q_s = \frac{184840\text{kgf}}{4.75\text{m}^2} = 38913\text{kgf/m}^2 = 3.89\text{kgf/cm}^2$

Se desconoce las características de fundación, pero de ser cierta la hipótesis planteada, el suelo podría estar trabajando con un factor de seguridad muy bajo ante cargas estáticas.

Por otra parte, cabe recordar que la ciudad en donde se ubican los tanques (Barquisimeto), se encuentra en la zona sísmica 5, con peligro sísmico elevado y una aceleración máxima del terreno de  $0.3g$ , según la Norma Venezolana COVENIN 1756-2001 "Edificaciones Sismorresistentes". Se pueden esperar cortes basales del orden de los  $55000\text{ kgf}$ , produciendo momentos volcantes del orden de  $168000\text{kgfxm}$ . La excentricidad producida sería de  $0.91m$ . El factor de seguridad al volcamiento es de aproximadamente  $FS_{volc}=1.65$ , el cual resulta satisfactorio, sin embargo, las presiones de contacto pueden llegar a  $7.66\text{ kgf/cm}^2$ , lo cual resultaría excesivo, produciéndose un hundimiento parcial del tanque por sobrecarga.

Para los tanques de ácido diluido se tienen los siguientes datos:

- Peso propio del tanque de fibra de vidrio:  $W_{tan} = 5000\text{kgf}$  (estimado con base a un espesor de 5cm de fibra y resina con un peso específico de 1.6 ton/m<sup>3</sup>).
- Peso del ácido sulfúrico:  $W_{acido} = 40000\text{kgf}$
- Área de los muretes-pedestales:  $A_{ped} = 3*1.1814\text{m}^2 = 3.54\text{m}^2$
- Peso de los muretes-pedestales:  $W_{ped} = 3.54 \times 0.6 \times 2400\text{kgf} = 5098\text{kgf}$
- Peso total del sistema:  $W_{tot} = 5000 + 40000 + 5098 = 50098\text{kgf}$
- Presión de contacto:  $q_s = \frac{5098\text{kgf}}{3.54\text{m}^2} = 1440\text{kgf/m}^2 = 0.15\text{kgf/cm}^2$

Las presiones de contacto en los tanques de fibra de vidrio son considerablemente bajas, por lo que su grado de peligrosidad actual es mucho menor que la que presenta el tanque de ácido concentrado.

En cualquier caso, las bases de los tanques presentan un deterioro progresivo que de un corto a mediano plazo, pueden presentar fallas graves que pongan en peligro las instalaciones y por ende la paralización de la producción en la fábrica.

## 4. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Debido a la precaria condición del concreto armado de la losa de piso, bases de los tanques de ácido sulfúrico y área inferior de los muros de la piscina contenedora de derrames, para una zona sísmica, se presentan las recomendaciones de diseño y protección de un concreto expuesto a ácido sulfúrico y se propone la atención al caso mediante dos acciones a emprender, una de carácter provisional y otra definitiva.

#### **4.1. Recomendaciones generales de protección del concreto al ataque del ácido sulfúrico.**

Como se mencionó en el diagnóstico, todo concreto expuesto a la acción de ácidos es susceptible a la degradación. La presencia de condiciones de acidez en el caso del ácido sulfúrico requiere que se tomen medidas de seguridad adicionales, tales como la provisión de membranas y barreras protectoras. Por esa razón, se presentan las especificaciones de diseño de la mezcla de concreto y los posibles revestimientos a utilizar, tomados de los trabajos presentados por Pinto y colaboradores (2008) y Eurocode (2000).

Con respecto al concreto:

Debe ser duro y compacto, de forma simple y de superficie lisa, cerrada y sin fisuras. De este modo se puede reducir la superficie sometida al ataque. Es recomendable el uso de un concreto con baja permeabilidad y utilizar áridos calizos para neutralizar el ácido. El recubrimiento del concreto sobre la armadura debe tener el mayor espesor posible, siendo deseable aumentar el recubrimiento de concreto como concreto de sacrificio. Las especificaciones recomendadas se resumen en:

El cemento debe ser resistente a los sulfatos (dosis de  $\geq 300$  kg/m<sup>3</sup>). El árido empleado será como mínimo de un 80% calizo. El contenido de sulfatos de los áridos, expresado en SO<sub>3</sub>, se limita al cuatro por mil del peso total del árido. La relación agua/cemento será como máximo de 0,45. Se podrá añadir aditivos que mejoren la trabajabilidad del concreto con el objeto de reducir la relación agua/cemento. La resistencia a compresión del concreto debe ser como mínimo de 40 MPa. Aunque no está recogido en la Norma UNE 127.010, actualmente se está extendiendo el uso de aditivos poliméricos que, incorporados al hormigón, mejoran su comportamiento ante el ataque de ácidos.

Con respecto a los revestimientos se recomiendan

Impregnaciones o Revestimientos, tales como: Polivinilo, Polietileno polisulfónico, Caucho al cloro, ó el uso de Morteros ligantes de: Azufre, Silicatos, Resina Fenólica, Resina Furánica.

Como revestimientos minerales y resinas orgánicas, se distinguen dos sistemas: los orgánicos y los inorgánicos. Los primeros están constituidos principalmente por resinas epóxicas, poliuretano, furánicas, fenólicas o de poliéster. Los inorgánicos son a base de cemento.

Los sistemas de impregnaciones, hacen al concreto menos permeable debido a reacciones en las cuales se forman cristales en los poros y capilares del concreto. Hay diversos sistemas disponibles: los mono componentes que se aplican como pintura sobre el concreto en no más que dos capas. Su resistencia química está en una tasa de pH entre 3 y 11, pero no poseen resistencia a la abrasión. El segundo sistema de este tipo, se adiciona al concreto durante su mezcla, lo cual resulta adecuado para concretos nuevos.

Revestimientos de alta resistencia química a base de cemento muy gruesos ( $> 5$  mm). Usan cementos exentos de C3A. Pueden ser aplicados manualmente o lanzados y tienen gran resistencia química (pH 3 a 14).

Revestimientos minerales de alta resistencia química exentos de cemento. El sistema de revestimiento de alta resistencia química tiene como base un silicato Polimérico. Consiste de gel de silicatos amorfos (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O) dentro de la matriz endurecida de esta sustancia mineral pura, cuya adherencia, durabilidad y estabilidad dimensional lo hacen ideal para la protección de superficies de concreto y acero en industrias químicas. Los revestimientos minerales a base de silicatos poliméricos están abiertos a la difusión de vapores de agua y son resistentes a los ácidos orgánicos e inorgánicos con pH próximos a CERO (excepto al ácido fluorhídrico) y resisten a temperaturas de hasta 580 °C.

Finalmente, otra alternativa para proteger el concreto son los revestimientos cerámicos, que consiste en la colocación de un revestimiento a base de cerámica de gres antiácida,

#### **4.2. Solución Provisional.**

Esta consiste en la construcción a la brevedad posible de unos elementos de concreto armado colocados debajo de los tanques de ácido, conformando unos macro tacos de concreto que garanticen apoyo y estabilidad a los mismos. Esta solución implica la eliminación del concreto desagregado y suelto de la losa de piso, bases de los tanques y muro de la piscina contenedora de derrames. Los macro tacos de concreto deben vaciarse hasta la misma altura de las bases existentes de los tanques utilizando un concreto autonivelante con  $R_{cc28} = 400 \text{ kg/cm}^2$  garantizando espesor de recubrimiento del acero de refuerzo por todas sus caras de 7 cm. Adicionar al concreto un sistema de cristalización o impregnación que hace al concreto menos permeable debido a reacciones mediante las cuales ocurre la formación de cristales en los poros y capilares del concreto. (Existen productos comerciales que responden a esas características). Paralelamente se debe incrementar la altura de las paredes de los Muros debido a la disminución del volumen útil por la presencia de los tacos de concreto. Para evitar la retracción en el concreto se pueden agregar fibras de polipropileno. Posteriormente nivelar la losa de piso hacia un punto de descarga o tanquilla de achique para evitar empozamiento del agua de lluvia o de derrames y facilitar la extracción controlada del líquido. La superficie interior de los pisos y muros puede ser revestido con cerámica de gres antiácida con juntas antiácidas.

#### **4.3. Solución Definitiva.**

Debido a la posible infiltración del ácido al suelo ubicado debajo de la piscina contenedora de derrames, se hace necesaria la evaluación de la magnitud de esta contaminación a los fines de su mitigación. En tal sentido es posible que el tratamiento que pudiera ser requerido implique la eliminación de la estructura existente en la zona. Se sugiere la reubicación de los tanques de ácido sulfúrico y la piscina contenedora de derrames, a los fines de dar respuesta definitiva a las causas que generaron el daño en la estructura existente. Se debe ubicar el sitio, preparar el terreno realizar el proyecto y proceder a la construcción de una nueva estructura.

Para ambas alternativas se sugiere que los equipos de bombeo y de control se ubiquen fuera de la piscina contenedora de derrames, ya que dichos equipos quedarían prácticamente inoperativos en caso de un derrame masivo de ácido.

Adicionalmente a lo indicado resulta vital para el funcionamiento adecuado del área, preparar y ejecutar un plan de mantenimiento preventivo y establecer una rutina de limpieza cada vez que ocurran derrames a fin de evitar la presencia de ácidos por largos periodos de tiempo que disminuyen de manera considerable la vida útil de las obras.

### **5. CONCLUSIONES**

Como conclusión del análisis químico y correlación con los ensayos físico- mecánicos se puede decir que la base de los tanques de ácido sulfúrico, y la losa de piso de la piscina contenedora están gravemente afectados por el ácido, los muros laterales aun cuando no reportan daños graves de deterioro aparente en la matriz de concreto, ni en los aceros ubicados en la parte superior de los mismos, en la base han perdido continuidad y conexión con la losa de piso lo cual hace imposible su recuperación. Se debe recordar que el contenido de sulfatos en las muestras del concreto de los muros excede el máximo valor aceptable. La condición de daño y la vulnerabilidad de la estructura ante eventos sísmicos obligan a la ejecución inmediata de la propuesta de solución provisional mientras se realiza el procedimiento administrativo y legal para la ejecución de la propuesta definitiva planteada.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

El Eurocode 2 y el diseño de estructuras durables y resistentes.

([http://www.imcyc.com/revista\\_2000/abril2000/eurocode2.htm](http://www.imcyc.com/revista_2000/abril2000/eurocode2.htm))

Fernández G., González G., Hostalet F. y otros (2001). *Evaluación de la capacidad Resistente de Estructuras de Hormigón. Ensayos no destructivos y destructivos*. INTEMAC Madrid, España.

Feliu S. y Andrade, C.(1989) *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión*. Madrid, España. Instituto de la Ciencia de la Construcción EduardoTorroja CSIC. Madrid España, p. 70  
NORMA COVENIN 1756-2001. “*Edificaciones Sismorresistentes*”. Normas Venezolana, Caracas 2001

Pinto J., MinoruTakagi E. y Bauchemie -MC. *Protegiendo a través de la impermeabilización*.

Red DURAR CYTED (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*.España: CYTED, 2da edición., p 117-121.

Revista IMYC, Mexico. (<http://www.imcyc.com/ct2008/may08/tecnologia.htm>)