



Ante la ocurrencia de una falla, las empresas aplican metodologías de análisis para determinar sus causas y minimizar, de ese modo, la probabilidad de ocurrencia de fallas similares. En la mayor parte de los casos, determinar las causas inmediatas suele ser suficiente. Una causa inmediata es algún evento que ocurrió y cualquier condición que existió inmediatamente antes del resultado indeseado, y que directamente produjo su ocurrencia. Si esta causa hubiera sido eliminada o modificada, habría prevenido el resultado indeseado.

Sin embargo, la utilidad de este método no permite identificar posibles causas más profundas, o más arraigadas en la organización, que

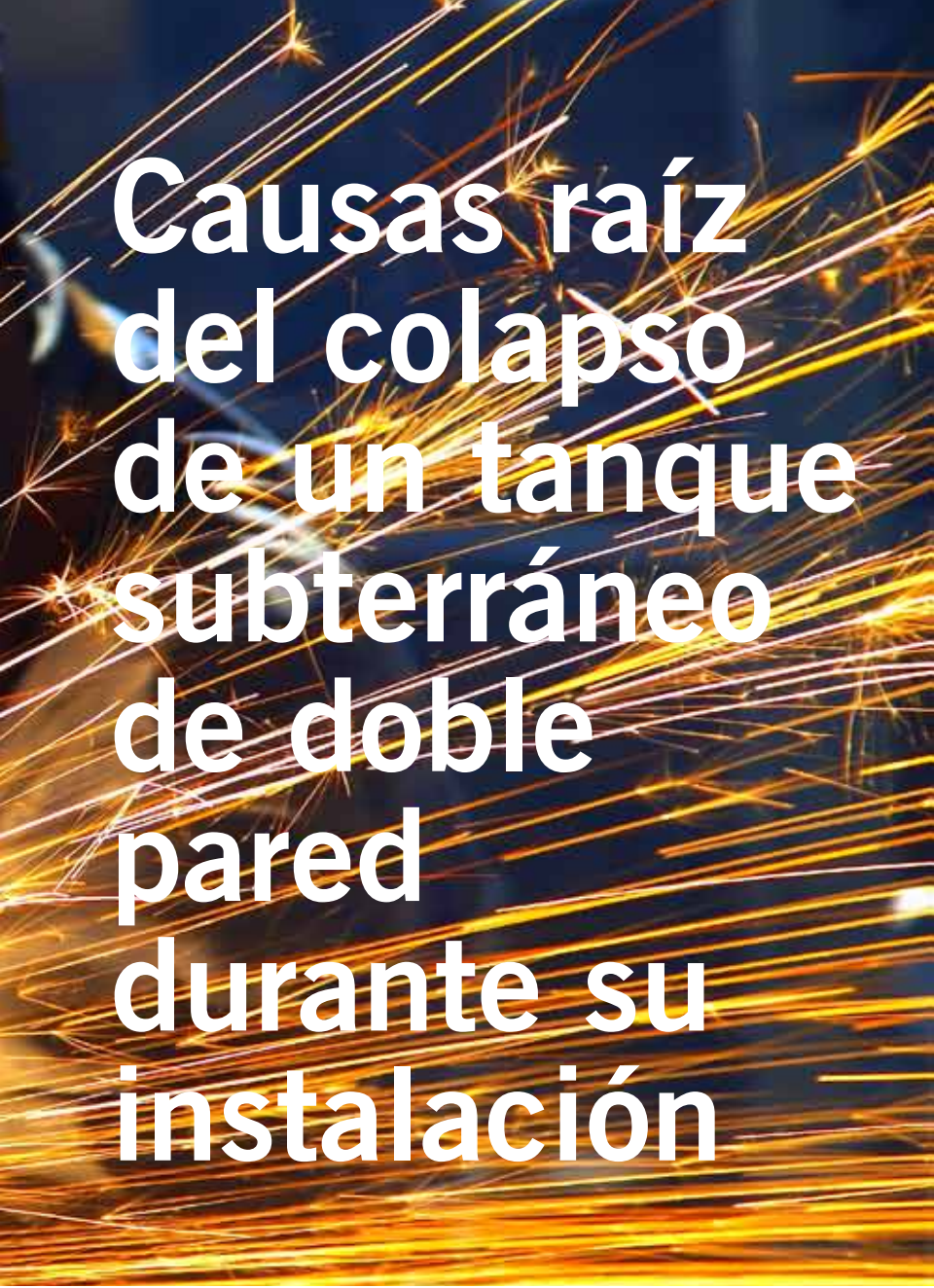
pueden quedar sin corregir y eventualmente provocar otras fallas [1]. Está probado que la mayoría de las fallas en las organizaciones son crónicas: ocurren más de una vez por la misma razón. Una causa raíz es cada uno de los factores múltiples (eventos, condiciones o factores orgánicos) que contribuyó o creó la causa inmediata y el resultado indeseado subsiguiente. Si son eliminadas o modificadas, no solo se habrá prevenido el resultado indeseado, sino otros en componentes diferentes. Un análisis de causas raíz (*root cause analysis*, RCA) bien realizado permite:

- La reducción del número de incidentes, fallos y desperdicios.
- La reducción de gastos y de la producción diferida, asociada a fallos.

- El mejoramiento de la confiabilidad, seguridad.
- El mejoramiento de la eficiencia, la rentabilidad y la productividad.

A veces se cree que luego de una falla, la acción correcta es reunir un grupo de expertos, sentarlos en un lugar aislado, y pensar que al cabo de unos días vendrán con las respuestas. Por el contrario, un análisis concienzudo requiere de la participación de todas las personas que puedan estar involucradas en el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de la pieza fallada.

El método que más se utiliza para descubrir todas las posibles causas de la falla es del tipo tormenta de ideas (*brainstorming*). Este grupo de traba-



Causas raíz del colapso de un tanque subterráneo de doble pared durante su instalación

En este trabajo se muestra un ejemplo exitoso de un análisis de causas raíz de falla de un tanque de 40 m³ con doble pared usado para el almacenamiento subterráneo de hidrocarburo líquido. Dentro de las lecciones aprendidas se encuentra la incidencia de una comunicación inadecuada entre las áreas de operación, obras y mantenimiento de las empresas del sector.

Por **Janine Booman** (FCEIA-UNR),
José Luis Otegui (Conicet - UNLP) y
Eduardo Borri (Bertotto Boglione S.A.)

jo desarrolla el árbol de causa-efecto, donde se plantean todas las posibles causas, y las causas de las causas, y así sucesivamente. Luego se definen los estudios que deben realizarse para falsar cada causa. Decimos falsar y no verificar, porque si no podemos asegurar que una causa definida es falsa, no podemos eliminar su posibilidad. Una vez eliminadas todas las causas falsadas, queda el árbol consolidado de causa-efecto, y en él, las causas inmediatas y las causas raíz. Esto fue realizado para el caso en estudio.

El equipo fallado es un tanque cilíndrico de 40 m³ con doble pared, para almacenaje subterráneo de combustibles [2]. La pared interior, o tanque primario, es de acero, para contener el combustible, y la exterior de

plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). El tanque primario es de 2, 3 m de diámetro, soldado con chapas de acero de baja resistencia de 6 mm de espesor, los cabezales son torisféricos. En la figura 1 se muestra un esquema del extremo del tanque que resulta de interés para este estudio, en el cual se indican detalles (a) de las conexiones en el domo y (b) de la geometría y colocación del tubo sensor.

El tubo sensor atraviesa el tanque y llega al intersticio con la cubierta exterior de PRFV. Entre las dos paredes tiene que haber vacío. El tanque se instala algo inclinado, con la parte del tubo sensor a menor profundidad. Durante la operación normal del tanque bajo el suelo de las estaciones de servicio, regularmente se

mete una varilla por el tubo sensor y se verifica que salga seca. Si llegara a haber una pérdida de combustible por el tanque de acero, esta quedaría contenida en la doble pared, y se podría detectar midiendo en el fondo del tubo sensor.

Hasta el momento de la instalación bajo tierra, el equipo se encontraba con el vacío especificado en la doble pared. La falla se detectó mientras se realizaba una prueba hidráulica: presencia de agua en el tubo sensor.

Desarrollo

1. El evento

El operador realizó la prueba hidráulica para verificar la instalación

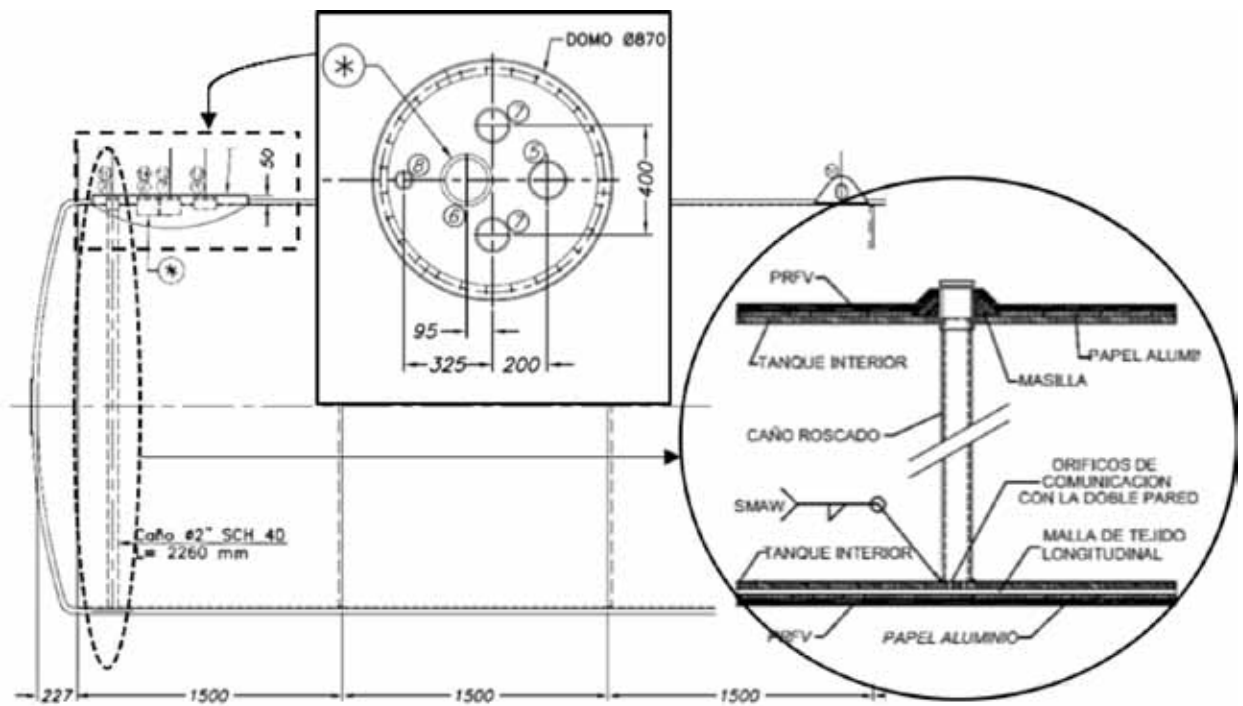


Figura 1. Esquema del extremo del tanque, (a) conexiones en el domo y (b) tubo sensor.

nueva. Al llegar a 0,6 Bar desconectaron la bomba para purgar el aire en la cañería. Al reiniciar y cuando la presión llegó a 0,7 Bar, el tanque tembló bruscamente. El caño de 2" sobre la cupla del caño sensor estaba lleno de agua, y de esta salían burbujas de aire. Al caminar sobre el tanque, notaron que la cubierta exterior de PRFV ya no presentaba una superficie firme, sino mullida, como si estuviera lleno de agua interiormente. La indicación del manómetro fue bajando, pero muy lentamente.

Al retirar el agua del caño sensor, esta volvió a brotar. Se interpretó inicialmente que el tanque interno había presentado una fuga, llenando la cubierta de PRFV de agua, por ello se abrió el domo (Figura 2) y se realizó una prueba neumática de la cubierta exterior, mientras se inspeccionaban con agua jabonosa las soldaduras desde el interior del tanque.

Los resultados fueron inconclusos, pero se sospechó de la costura circunferencial de uno de los cabezales, en la parte inferior, donde se

realizó una *reparación* (Figura 3). Luego se hizo vacío en la doble pared, el cual se mantuvo por, al menos, 12 horas. Como estos ensayos no permitieron determinar el origen de la falla, se decidió desenterrar el tanque, reemplazarlo y someterlo a un análisis de causas raíz en instalaciones del fabricante.

2. Validación del árbol de causa-efecto

En base a la revisión de antecedentes efectuada, se armó el árbol de causa-efecto [3,4]. Se acordó la realización de estudios para falsar cada posible causa, con los resultados que se detallan en la figura 4. Se observan en rojo todas las causas que no pudieron ser descartadas.

1. Medición de deformaciones en el tanque fallado y en tanques similares en stock antes y después de la PH: no se observaron diferencias significativas.
2. Inspección interna: se observaron cabezales torcidos y deformación de las planchuelas de soporte de los caños de descarga y de medición de nivel se detectó una fisura en la planchuela del caño central (medición de



Figura 2. Intento de reparación del tanque ya enterrado.

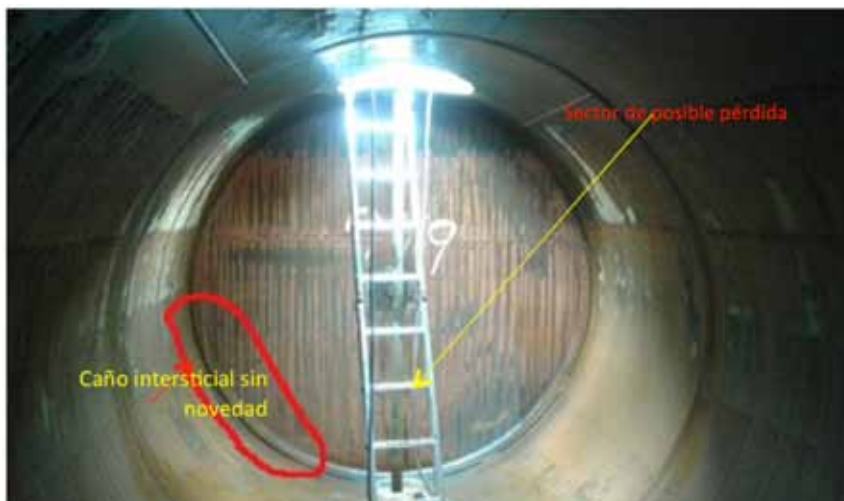


Figura 3. Vista interna, se indica zona de presunta reparación.

nivel), del lado de las tensiones de compresión según la deformación evidenciada (ver detalle en la figura 5).

3. Inspección de caños y placas de tanques en stock antes y después de la PH, a través de la cupla de 6": no se observaron deformaciones.

4. Prueba de vacío en las condiciones actuales: no se mantuvo el vacío.

5. Prueba de chispa y reparación de las roturas en la cubierta de PRFV: todas las roturas encontradas fueron provocadas durante el desentierro del tanque, luego de la detección de la falla. Se repararon y se dio vacío de 30 cm/hg, el cual se mantuvo.

6. Prueba neumática en la doble pared a 2 psi e inspección con agua y jabón en el exterior: no se detectaron pérdidas al exterior

de la cubierta de PRFV. Una pequeña pérdida de presión fue debida a que todavía existía agua en el intersticio.

7. Limpieza del interior del tanque y prueba neumática del intersticio a 2 psi, e inspección con agua y jabón desde el interior: no se detectaron pérdidas.

3. Verificación de la hipótesis de falla

Se realizó una prueba hidráulica en el intersticio de la fibra, sosteniendo los cabezales con sobre-cabezales unidos por tirantes para simular las condiciones de contención del tanque enterrado. Se midió la cantidad de agua agregada para verificar la posibilidad de que por un error operativo se hubiera llenado el intersticio de agua, en lugar del tanque, en alguna de las maniobras previas a la presurización del tanque.

La presión alcanzó los 10 Bar cuando solo habían ingresado unos pocos litros, debido a que el caño sensor estaba ocluido. Luego de destapar el caño sensor se presurizó lentamente el intersticio entre tanque y

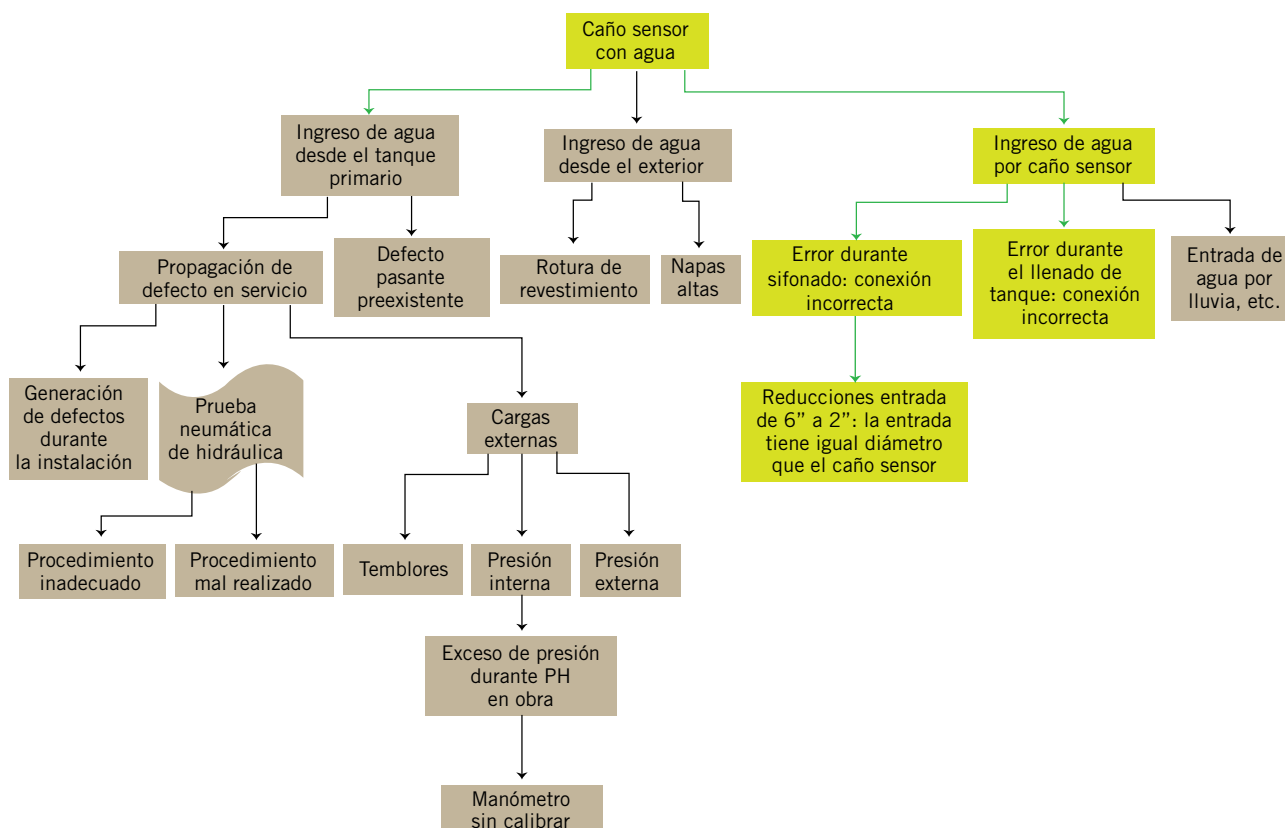


Figura 4. Árbol de causa-efecto.

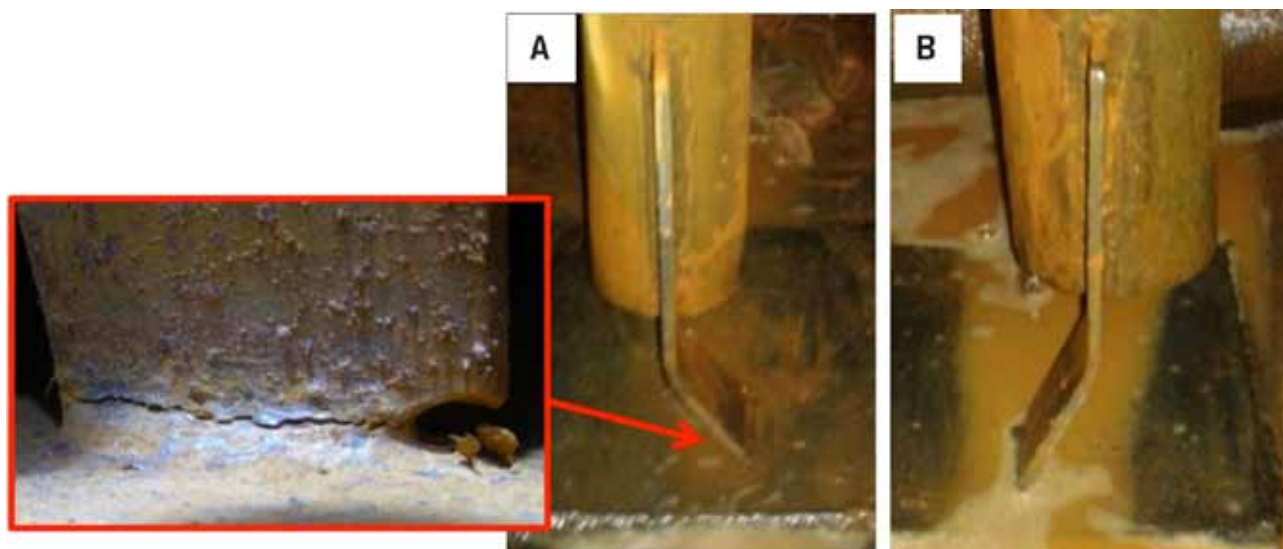


Figura 5. a) caño de medición de nivel (central), con fisura, b) Caño de descarga. Ambos con soportes laterales doblados.



Figura 6. Abolladura observada en el interior del tanque.

cubierta. Al detener el ensayo periódicamente y esperar que se estabilizara la presión, se pudo monitorear la presión en la doble pared. Al presionar la cubierta, se podía detectar cómo se despegaba del tanque a partir de la altura de llenado.

Al principio, al cerrar la válvula, la presión caía a 0. Luego de ingresar unos de 100 l, la presión caía cada vez menos. La anteúltima vez que se cerró la válvula, la presión cayó a 0,6 Bar. Luego se aumentó la presión hasta 1,2 Bar por unos minutos más. Es

decir, la cubierta resistió una presión de 0,6 Bar como mínimo, y de 1,2 Bar como máximo. Al cerrar la válvula, la presión cayó por debajo de los 0,4 Bar; al ingresar al tanque se observó una abolladura (Figura 6). Se observó además que las chapitas de soporte de los caños internos estaban dobladas y fisuradas, de manera similar a la observada luego de la falla (Figura 5), a pesar de que una de ellas había sido enderezada. En resumen, el tanque se abolló entre los 0,6 y 1,2 Bar; el agua alojada en el intersticio fue

550 l. En ningún momento se detectó un ruido o indicio de que el tanque se estaba abollando.

Luego de remover la cubierta en la abolladura, se presurizó el tanque hasta 2 Bar con los cabezales de refuerzo colocados, para visualizar la restitución de la abolladura durante la prueba. La evolución de la abolladura fue monitoreada con pequeños tramos de alambre, originalmente casi rectos (Figura 7). Con el propio peso del agua, se observó una leve restitución de la abolladura. Durante la prueba de presión, la abolladura se fue restituyendo de a poco y en una sola ocasión se escuchó un pequeño ruido, al llegar a 1,5 Bar. En la figura 8 se observa el nivel de deformación al inicio de la prueba (a) y al alcanzar 1,5 Bar (b).

5. Discusión de resultados

El ensayo de tintas penetrantes y las sucesivas pruebas hidráulicas realizadas a posteriori de la falla permitieron descartar la entrada de agua a la doble pared desde el tanque primario. El mantenimiento del vacío luego de la supuesta reparación permitió descartar la entrada de agua desde la doble pared. Estos ensayos permitieron descartar el origen sospechado de la falla: no había existido una fuga.

A partir del análisis de causas raíz se pudo plantear una nueva hipótesis para las causas de la falla. Las pruebas hidráulica en el intersticio tanque-cubierta permitieron verificar que el ingreso de agua por el



Figura 7. Alambres colocados para evidenciar restitución de la abolladura.

caño sensor habría generado la abolladura del tanque primario antes que la rotura de la cubierta, a una presión entre 0,6 y 1,2 Bar. La abolladura del tanque interno provocó la disminución de la presión por el aumento de tamaño del intersticio. La abolladura generada en el ensayo produjo daños en los caños interiores consistentes con los observados en la inspección posfalla (Figura 4).

El burbujeo observado en el momento en que se detectó la falla puede explicarse por la presencia de aire

y agua en el intersticio que, a causa de la restitución de la abolladura, elevó su nivel (Figura 9 a y b). La recuperación del nivel del agua en el caño sensor es consistente con que se equilibrara el nivel de líquido presente aún en el intersticio (Figura 9 c y d). El paso del agua desde el intersticio al caño sensor es restringido, por lo que alcanzar el equilibrio pudo requerir algunos minutos.

El momento de llenado del intersticio con agua y la generación de la abolladura no pudo ser deter-

minado, ya que durante los ensayos se observó que puede no ser detectable desde el exterior. Sin embargo, debido a que el tanque fue recibido sin abollar y con vacío en la doble pared, se concluye que la abolladura fue generada en algún momento previo a la prueba hidráulica, y que al realizarse, fue restituida. Los ruidos y el sacudón informados son consistentes con la restitución de una abolladura de dimensiones mayores a las generadas en las pruebas posteriores de verificación.

Existe una ventana de tiempo de aproximadamente un mes en la que cualquiera podría haber generado una conexión errónea, propiciada por la gran cantidad de conexiones del mismo diámetro en el domo (Figura 1 a). En ese momento se hizo ingresar agua al intersticio generando la abolladura sin percibirlo. La cubierta de PRFV mostró tener una mayor resistencia a la presión interna que el tanque primario a la presión externa, al colapsar el tanque primario antes que se generara rotura en el PRFV.

Cada evento tiene, al menos, dos causas: un evento y una condición [5]. Las condiciones existen durante períodos prolongados de tiempo, mientras que los eventos son acciones o cambios de estado directamente relacionados con el incidente, lo que hace que su relación con el evento sea inmediata. A menudo, se identi-



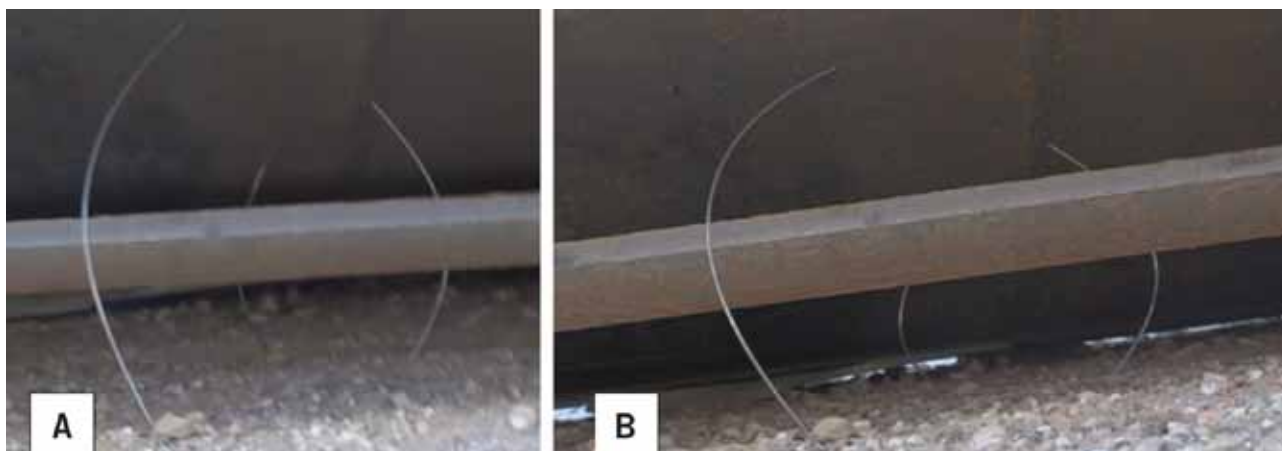


Figura 8. Comparación de deformación antes y después de alcanzar 1,5 kg/cm².



Figura 9. Evolución del nivel de agua en la doble pared en las distintas etapas de la falla.

fica el evento inmediato como única causa. Sin embargo, la identificación de las condiciones preexistentes es un aliado importante a la hora de prevenir la recurrencia de un incidente, puesto que el período durante el cual existió y, por ende, podría haber sido detectada y corregida, es mucho mayor. Esto hace que sea más efectivo prevenir si se actúa sobre las condiciones que sobre los eventos.

En el caso de estudio, el evento que generó la falla fue una equivocación al llenar el tanque, pero una condición que permitió que este evento ocurriera fue la utilización de reducciones instaladas en las bocas utilizadas para la presurización y el llenado del tanque, lo que generó que existieran tres conexiones de 2", y entre ellas, el caño sensor.

En el diseño original, el caño sensor es la única conexión de 2", lo que facilita su identificación. Es habitual que las modificaciones al diseño generadas en obra o durante la operación, cuando no están asociadas a un exhaustivo análisis previo, generen condiciones adversas imprevistas, como la mencionada.

Conclusiones

En este artículo se muestra un ejemplo exitoso de un análisis de causas raíz de falla. El método fue aplicado ante la falla durante la prueba hidrostática preoperacional de un tanque de acero con una cubierta de PRFV, usado para el almacenamiento subterráneo de hidrocarburo. Cuando la presión llegó a 0,7 Bar, el tanque tembló bruscamente, y el caño sensor del intersticio tanque-cubierta indicó que este se había llenado de agua.

Los estudios experimentales y los modelos realizados permitieron determinar que no había ocurrido una fuga en el tanque, sino que el ingreso de agua al caño sensor y al intersticio entre el tanque y la cubierta fue a través de agua ingresada desde el exterior a través de la conexión del caño sensor. Esto se atribuye a, al menos, dos causas raíz:

- un error durante las maniobras previas a la prueba hidráulica (evento).
- modificaciones en el diseño a partir del acoplamiento de re-

ducciones a las conexiones por las que se llenó y se presurizó el tanque, que generó tres conexiones del mismo diámetro, que incluye el caño sensor (condición).

La abolladura producida originalmente solo fue detectada durante la prueba hidráulica cuando la presión interna en el tanque generó su restitución.

Bibliografía

1. Otegui, J. L. (2014). Failure Analysis, Fundamentals and Applications in Mechanical Components. Jose Luis Otegui. Springer.
2. [www.bertotto-boglionone.com > products > view > TANQUE_DOBLE_PARED](http://www.bertotto-boglionone.com/products/view/TANQUE_DOBLE_PARED)
3. Otegui, J. L. y Rubertis E. (2008). Cañerías y recipientes a Presión. Eudem.
4. ASM Metals Handbook. Volume 11: Failure Analysis and Prevention.
5. Eckert. (2005). Apollo Root Cause Analysis (RCA)-A Summary, ApolloAssociated Services, Ltd.

ESTAMOS PARA QUE NOS ENCUENTRES

EL INSTITUTO ARGENTINO DEL PETRÓLEO Y DEL GAS
AHORA EN TUS REDES SOCIALES



facebook.com/IAPGinfo
facebook.com/IAPGEduca



@IAPG_info
@IAPGEduca



youtube.com/IAPGinfo



INSTITUTO ARGENTINO
DEL PETRÓLEO Y DEL GAS

www.iapg.org.ar