

**CARACTERIZACIÓN MEDIANTE API 653 DEL MECANISMO DE DAÑO POR
CORROSIÓN INTERNA A LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE DE LAS
SOLDADURAS A SOLAPE DE LAS LÁMINAS TRANSLAPADAS EN TECHOS DE
TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO**



**MONOGRAFÍA PARA OBTENER EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN DE
LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN**

PRESENTA:

ING. MICHAEL SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADOS
TUNJA
2020**

**CARACTERIZACIÓN MEDIANTE API 653 DEL MECANISMO DE DAÑO POR
CORROSIÓN INTERNA A LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE DE LAS
SOLDADURAS A SOLAPE DE LAS LÁMINAS TRANSLAPADAS EN TECHOS DE
TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO**

MICHAEL SÁNCHEZ RODRÍGUEZ



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADOS
TUNJA
2020**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja 11 de octubre de 2020

DEDICATORIA

A mi esposa Julieth por su fe y apoyo incondicional por ser esa persona que siempre estuvo a mi lado acompañándome en este camino aún en los momentos más difíciles; a mis padres Clara y Andrés porque fue gracias a ellos que empezó toda esta travesía, los que me dieron el primer empujón y nunca han dejado de creer en mí; a mis hijos David y la pequeña Valentina quien esta aportas de visitarnos en este mundo porque es en ellos en quienes pienso cuando veo las metas a alcanzar como un legado.

También quiero agradecer a los profesores por dedicar tanto tiempo y esfuerzo a la docencia son ellos quienes aportan ese grano de arena tan necesario para formar nuevos profesionales idóneos en este sector.

CONTENIDO

GLOSARIO.....	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 Formulación del Problema.....	11
1.2 Descripción del Problema.....	11
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo General.....	11
2.2 Objetivos Específicos	12
3 MARCO REFERENCIAL.....	12
3.1 Estado del Arte.....	12
4 MARCO METODOLÓGICO	16
5 DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA	19
5.1 Descripción del Equipo.....	19
5.2 Determinación de los Mecanismos de Corrosión	20
5.2.1 Monitoreo de Gases en Techos de Tanques	20
5.2.2 Análisis de Fluidos	21
5.2.3 Inspección de Sistema de Protección Catódica	21
5.2.4 Monitoreo de Corrosión Interna.....	21
5.3 Caracterización de los Mecanismos de Daño.....	22
5.3.1 Inspección de Tanque de Techo Cónico Soportado (fijo)	22
5.3.2 Inspección Visual Externa del Techo	23
5.3.3 Medición de Espesores de Película Seca en el Recubrimiento del Techo	24
5.3.4 Medición de Adherencia de Recubrimiento en Cuerpo.....	25
5.3.5 Medición de Espesores en Boquillas	26
5.4 Evaluación de Integridad Mecánica.....	28
5.5 Cálculos de Integridad Mecánica	29
5.5.1 Criterios de Aceptación.....	29
5.5.2 Cálculo de Espesores Mínimos en Cuerpo y Techo.....	30
5.5.3 Velocidad de Corrosión.....	30
5.5.4 Cálculos de Vida Remanente	31

5.6	Intervalos de Inspección	32
5.6.1	Inspección Externa	32
5.6.3	Inspección Interna	33
5.7	Mecanismos de Daño Activos.....	33
5.8	Análisis de Falla del Recubrimiento.....	35
5.8.1	Deterioro del Recubrimiento Externo del Cuerpo	35
5.8.2	Deterioro Prematuro Del Recubrimiento Externo Del Techo	36
5.8.3	Deterioro Prematuro Del Recubrimiento Interno Del Techo	37
6	CONCLUSIONES	40
7	RECOMENDACIONES	41
8	BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del tanque de almacenamiento de crudo.	19
Tabla 2. Monitoreo de gases.	20
Tabla 3. Potenciales estructura-suelo tanque de almacenamiento de crudo.	21
Tabla 4. Espesores mínimos por cada CML.	23
Tabla 5. Película seca en recubrimiento del techo.	24
Tabla 6. Adherencia en recubrimiento del cuerpo.	25
Tabla 7. Valores Scan A boquillas del techo.	26
Tabla 8. Scan A boquillas del cuerpo del tanque.	27
Tabla 9. Scan A en láminas del cuerpo del tanque.	27
Tabla 10. Historial de inspección del tanque de almacenamiento de crudo.	28
Tabla 11. Clasificación de corrosividad en cupones según tabla 2 NACE RP0775-2005.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuración angular Phased Array	13
Figura 2. Resultados de inspección mediante PAUT sectorial	13
Figura 3. Capacidad de detección mediante técnica TOFD.....	15
Figura 4. Detección mediante scan C sobre la unión soldada.....	16
Figura 5. Detección mediante PAUT y zapata plana.....	17
Figura 6. Configuración del techo del tanque e inspecciones realizadas.	22
Figura 7. Mapeo de corrosión zona afectada térmicamente.....	23
Figura 8. Esquema de recubrimiento en uniones traslapadas del tanque	40

GLOSARIO

- A-Scan: Un método de presentación de datos en pantalla, utilizando una línea base horizontal que indica la distancia o tiempo y una deflexión vertical de la línea base, la cual indica la amplitud.
- Acoplante (gel): Medio líquido (agua - Metil Celulosa) utilizado para permitir la propagación ultrasónica entre dos materiales. Generalmente para acople entre la zapata y la pieza a inspeccionar.
- Apertura: Elementos activos que generan un palpador virtual (Ley focal o VPA).
- Element step: Es el salto electrónico que ejercen los pulsadores entre los elementos.
- Elementos activos: es el número de elementos que son excitados por los palpadores y generan cada VPA o ley focal.
- HydroFORM: Es un escáner para la inspección de corrosión interna, gracias a su columna de agua que elimina la necesidad de usar una zapata, este escáner brinda los beneficios de una inspección por ultrasonido multielemento similar a la que se lleva en un tanque de inmersión. También, ofrece excelentes condiciones de acoplamiento y adaptación a superficies, incluso en superficies rugosas.
- Ley focal o palpador virtual: Agrupación de elementos piezoeléctricos para generar un frente de onda ultrasónica; la configuración usada para scan C es la matriz lineal, la cual se puede configurar con el Scan lineal a cero grados. Se vale de un número determinado de leyes focales generados, según se requiera, el cual es multiplexado con el fin de obtener un barrido más ancho. Cada ley involucra el ajuste del retardo, el número de elementos activos, la posición de los elementos activos dentro del palpador, profundidad focal y una ganancia. A cada ley focal le corresponde un Scan A con los cuales se pueden generar distintas vistas.
- Método pulso eco: una técnica de inspección ultrasónica, en la cual la presencia y posición de un reflector, son indicados por el tiempo de vuelo y la amplitud de la señal.
- MUT (Manual Ultrasonic Examination) o EMUT (Encoded Manual Ultrasonic Examination): Una técnica de inspección ultrasónica que puede ser realizada con palpadores que son manualmente manipulados sin ayuda de un sistema mecánico guiado. Las técnicas manuales pueden ser codificadas de tal manera que la imagen puede ser reconstruida.
- Pitch: Paso, distancia entre centro de dos elementos contiguos del arreglo Phased Array.
- Pulso: Un tren de ondas cortas, producidas por vibraciones mecánicas.

- Scan lineal: Es el barrido electrónico que se realiza a lo largo del palpador con el fin de cubrir un área específica a inspeccionar. El scan lineal a cero grados (0°), incidencia normal, es el usado para la inspección de corrosión interna.
- Ultrasonido Phased Array (PAUT): Ultrasonido de arreglo en fase que emplea los mismos principios de la técnica pulso-eco del ultrasonido convencional, la cual mediante recursos tanto hardware como de software permite agrupar elementos, para crear una ley focal (palpador virtual) y configurar sus características, electrónicamente.

RESUMEN

En la siguiente monografía se lleva a cabo la caracterización y mecanismo de daño por corrosión que afectan la zona afectada térmicamente de uniones soldadas a filete-solape con las cuales se unen las láminas con las que se construyen los techos de los tanques de almacenamiento de crudo.

Para la valoración del mecanismo de daño se incluirá el análisis del fluido contenido por el tanque acompañado del análisis de gases y su monitoreo en el techo del tanque que es el área de interés; la caracterización de la corrosión se realizara mediante técnica Phased Array representación scan C, con la que se pretende determinar con precisión cuantitativa el valor de la perdida.

Los resultados obtenidos se evaluarán mediante API 653 y se realizaran cálculos de integridad mecánica donde se dará un criterio de aceptación o rechazo, se determinará la velocidad de corrosión, el cálculo de vida remanente y por último se propondrán los intervalos de inspección.

INTRODUCCIÓN

Basado en planes de integridad propuestos para los tanques de almacenamiento de crudo se hace un levantamiento de información del estado general del tanque que incluye ensayos no destructivos al cuerpo y boquillas del tanque, inspecciones del sistema de protección catódica e inspección del estado del recubrimiento, sin embargo hasta ahora no ha sido posible determinar el estado de integridad real del techo ya que al cortar y extraer una sección del techo se observa de manera visual que las perdidas más relevantes se encuentran en la zona afectada térmicamente por las uniones soldadas la cual sigue siendo una problemática sin resolver y es el objeto de esta monografía.

Los resultados obtenidos por ultrasonido Phased Array representación scan C se contrastan con lo estipulado en el estándar API 653 donde se determinará si las láminas cumplen o no basados en los criterios de aceptación y rechazo allí estipulados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la construcción de los tanques soldados de techo cónico soportado (fijo), los techos de estos se fabrican traslapando las láminas y realizando uniones soldadas en filete-solape; para crear las condiciones para el soldeo es necesario retirar el recubrimiento en los bordes de las láminas y de la zona que posteriormente va a ser afectada por el calor.

Luego de la terminación de las obras de soldadura del techo las cuales se realizaron a nivel de piso a este se le aplicó el recubrimiento pero únicamente por la parte superior de las láminas ya que la parte inferior era inaccesible al estar en el suelo, una vez terminados y realizados los ensayos a las uniones soldadas; por medio de izajes se instaló el techo en la parte superior del tanque quedando las uniones soldadas y la zona afectada térmicamente de la parte interior del tanque sin recubrimiento y por ende el metal expuesto a los distintos mecanismos de corrosión generados por los fluidos contenidos dentro del tanque.

1.2 Formulación del Problema

Caracterización del mecanismo de daño por corrosión interna en la zona afectada térmicamente de las soldaduras a filete-solape empleadas en la construcción de los techos de los tanques de almacenamiento de crudo producido.

1.2 Descripción del Problema

Debido a que las uniones soldadas y las zonas afectadas térmicamente quedaron expuestas a falta de recubrimiento y que el crudo producido que es el fluido que contiene el tanque genera gases como H_2S , O_2 , H_2O y CO_2 entre otros, estos por densidades se acumulan en la parte superior afectando directamente la zona del techo y específicamente la zona afectada térmicamente de las uniones soldadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar el mecanismo de daño por corrosión existente en la zona afectada térmicamente de las uniones soldadas a filete-solape de la parte interna de las láminas de los techos de los tanques de crudo producido y evaluarlas mediante API 653.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el tipo de corrosión existente en la zona afectada térmicamente de las soldaduras a filete-solape.
- Determinar los mecanismos de daño por corrosión existentes debido al fluido contenido en los tanques de almacenamiento de crudo producido.
- Realizar una comparación de los mecanismos de corrosión que afectan la parte interior de las láminas del techo de los tanques.

3 MARCO REFERENCIAL

3.1 Estado del Arte

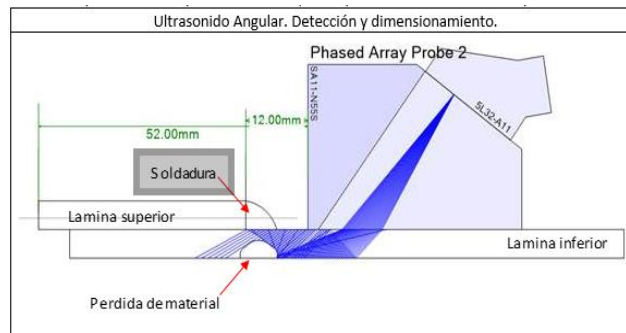
Una empresa colombiana muy reconocida realizó pruebas con equipos de ultrasonido Phased Array y check line para ejecutar el plan de inspección para la caracterización de los mecanismos de daño existentes en los techos de los tanques y en la zona afectada térmicamente de las soldaduras con que se construyeron. Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes.

Se verificaron las zonas propuestas en el plan de inspección ultrasonido Scan A, usando ondas longitudinales con el equipo check line y con un palpador normal dual de \varnothing 3/16in y 5Mhz de frecuencia, las medidas se toman con bastante dificultad debido al bajo espesor medido y a que las características del palpador no son las apropiadas para medir este tipo de morfología o superficies irregulares propias del mecanismo de daño corrosión interna; estas medidas deben ser puntuales y las zonas con mayor pérdida deben estar en una posición favorable para que el palpador pueda recibir la energía suficiente y logre medir correctamente el bajo espesor.

Para garantizar mediciones confiables se usaron palpadores con diámetros pequeños (menores a 3/16in), altas frecuencias (10 a 15 Mhz) y de ser posible con tips de retardo que permiten dejar la zona muerta en el tip y eliminar ruidos o ecos que enmascaran los ecos de los espesores reales.

Inspección con ultrasonido angular (Phased Array) en todas las soldaduras del tanque para confirmar/descartar la presencia del mecanismo de daño. Esta técnica me permitirá identificar pérdida de material y dimensionarla. La confiabilidad del dimensionamiento de las pérdidas de material es dependiente de la geometría de la pérdida de material. Sin embargo, esta inspección permitirá una aproximación de la profundidad real, y así definir en qué áreas se debe enfocar una inspección con mapeo de corrosión (Scan-C) con la técnica ultrasonido por inmersión localizada, la figura 1 muestra la reflexión de los haces angulares en la corrosión.

Figura 1. Configuración angular Phased Array

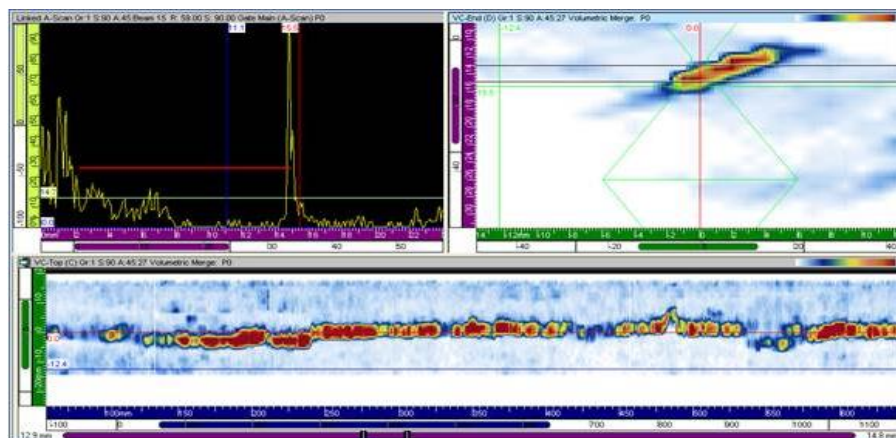


Fuente: Software Tomoview

Se realizaron varios barridos sectoriales empleando un equipo Omniscan MX2 16/128, palpador 5L60-A12 con zapata de onda transversal N55S-A12.

Al analizar el ensayo, se observó una baja probabilidad de detección y la medición cuantitativa de la pérdida no fue adecuada. El ensayo Phased array es basado en pulso-eco y amplitudes, y sería necesario realizar varios bloques de calibración con defectos simulados, para encontrar la relación cualitativa entre amplitud y profundidad de la corrosión, en la figura 2 se observa el comportamiento del Phased Array angular en las juntas a solape.

Figura 2. Resultados de inspección mediante PAUT sectorial



Fuente: Software Tomoview

Esta alternativa no es de alta precisión y de lograrse una adecuada configuración del equipo, se obtendrían datos cualitativos y no cuantitativos.

Al obtener estos resultados, se realizó simulación computarizada del comportamiento de los haces de la ley focal sectorial $45^\circ - 70^\circ$, y se observó que el mayor reflector queda en la esquina (mayor espesor), en el punto exacto donde se encuentra la pérdida mayor, los haces son dispersados a diferentes sitios, pero nunca retornan al palpador, condición necesaria para que la técnica mida.

Se realizaron diferentes simulaciones, asumiendo que la corrosión tenía forma de parábola y en otros casos, que tenía forma de caja rectangular; siempre se observó el mismo comportamiento.

Con esto se confirma que se puede establecer una criticalidad basada en amplitud, de acuerdo con la reflexión de la esquina, pero no se puede obtener el dato cuantitativo.

Se aplica la configuración propuesta por un inspector senior, con ultrasonido angular Phased Array, sin obtener resultados satisfactorios, se obtiene mucho ruido, no se logra ver nada, muchos reflectores enviando señal y teniendo en cuenta la morfología y ubicación de la corrosión, que no solo se presenta en la raíz de la soldadura, sino que también se encuentra en la HAZ, es bastante difícil interpretar las señales recibidas.

En dado caso que de alguna manera se logre una configuración y calibración del equipo para detectar este mecanismo de daño, esta técnica con dificultad solo arrojará información acerca de la presencia de la corrosión, no lograra dimensionar el mecanismo de daño, ni el espesor mínimo detectado y la probabilidad de detección es bastante baja, lo que quiere decir que las indicaciones con menor espesor serán imperceptibles.

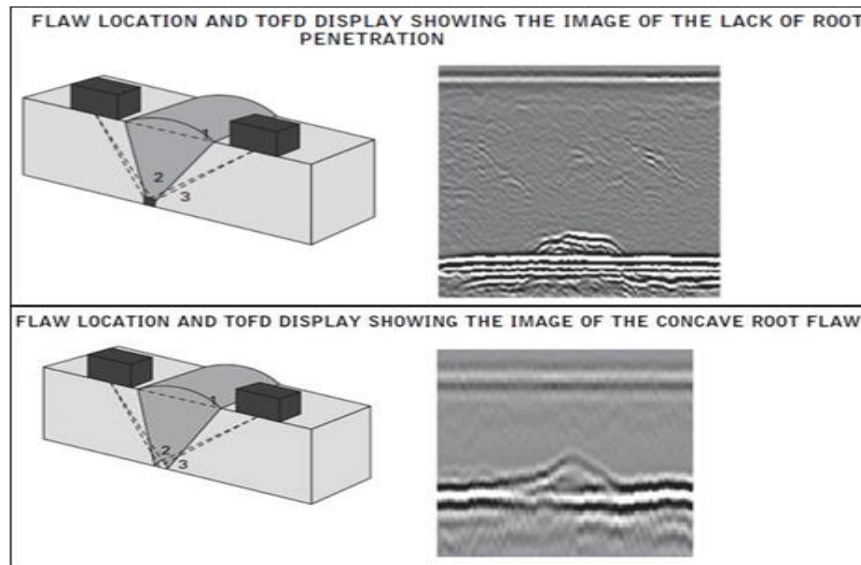
Basados en lo dicho anteriormente, si la técnica solo dice si hay o no hay corrosión (lo que ya se evidencio visualmente), realizar esta técnica esta demás, no aporta nada, se debe emplear ondas longitudinales que dimensionen y arrojen valores reales de los espesores mínimos, para realizar los cálculos de integridad.

Teniendo en cuenta que las ondas trasversales presentan limitaciones de detección en espesores menores a 5 mm, esta técnica no es la apropiada, para detectar y medir correctamente la corrosión preferencial en la raíz de soldaduras por medio de ultrasonido, se deben aplicar técnicas basadas en los principios de las ondas superficiales u ondas de Lamb.

En la práctica recomendada DNV-RP-G103 de inspección no Intrusiva, recomiendan la técnica TOFD para detectar corrosión/erosión en la raíz de soldaduras.

Adicionalmente, el código ASME SEC V:2007, incluyó todo un capítulo para la técnica TOFD, donde indica claramente mediante imágenes, la detectabilidad de los defectos: falta de penetración en la raíz, concavidades en la raíz y en este caso perdidas de espesor por corrosión, para lograr lo anterior se debe considerar la configuración de la junta traslapada con soldadura a filete y debemos realizar pruebas para verificar la correcta detección del mecanismo de daño con esta técnica, la figura 3 muestra la capacidad de detección de la técnica TOFD en juntas a tope.

Figura 3. Capacidad de detección mediante técnica TOFD



Fuente: ASME sección V

Consultando con un ingeniero nivel III en ultrasonido se le expuso el mecanismo de daño y sugirió una alternativa de última generación en ultrasonido es la técnica Full Matrix Capture (FMC/TFM).

La técnica Full Matrix Capture (FMC) es un método avanzado de adquisición y reconstrucción de datos colectados durante la aplicación de los ultrasonidos multielementos. La FMC se basa en el principio de focalización sintética, que se puede tratar por algoritmos que permiten obtener visualizaciones cercanas a la realidad.

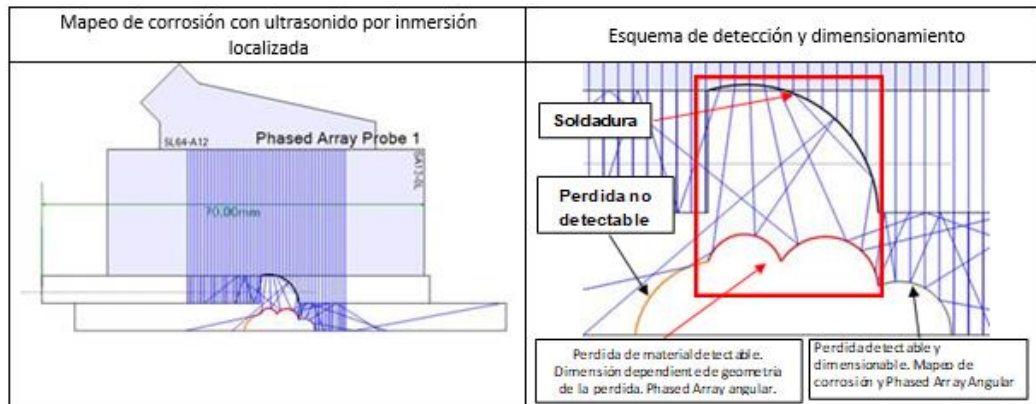
Ventajas:

- Mayor resolución de las indicaciones con una gran definición y mejor percepción de su orientación real, según el método de reconstrucción seleccionado.
- Mejor caracterización de las indicaciones.
- Reducción del nivel de ruido en relación con el PAUT normal.
- Mejor resolución y representación del perfil real de una superficie corroída.

En las áreas donde con Phased Array angular se identifique corrosión severa, se complementará la inspección con mapeo de corrosión por inmersión localizada

Es importante anotar que pérdidas de material bajo la geometría de la soldadura de filete con corte lineal cóncavo ó convexo, es difícil el dimensionamiento con Scan-C debido a que la geometría de la soldadura (superficie no normal a la entrada del haz), y de la pérdida de material, direccionará el haz en diferentes orientaciones y la energía ultrasónica que regrese el transductor será muy baja o nula, no obstante el objetivo es intentar obtener medidas confiables con ultrasonido angular, y complementar con mapeo de corrosión en las áreas adyacentes con el siguiente esquema de inspección, en la figura 4 se observa lo que sería el comportamiento teórico de los haces mediante una simulación computarizada.

Figura 4. Detección mediante scan C sobre la unión soldada



FUENTE: Software Esbeam tool

Se realizaron varias pruebas aplicando el siguiente procedimiento:

- Se desarma el escáner del hydrofom y se saca solo el palpador.
- Con las espumas del hydrofom se corta a la mitad una y se sobrepone sobre la espuma existente, para compensar la altura de las láminas traslapadas.
- Se realizan varias pruebas para lograr la hermeticidad de la zapata, generar la columna de agua y obtener señal, pero es imposible con esta modificación.
- Luego se introduce a la zapata, silicona que se extrajo de un pad mouse, para así remplazar la columna de agua por la silicona y lograr el acople necesario para las mediciones y se envolvió en vinipel para que no se saliera la silicona.
- Se logra hacer sello de la zapata y el palpador emite las señales de la zapata correctamente, se logra calibrar en la lámina de prueba en una zona sana con 4.7 mm con el segundo y tercer eco, cuando ubica sobre la soldadura se empezó a dañar el vinipel, se sale la silicona, se deforma debido a la irregularidad de la superficie de la soldadura.

Se continúa la inspección de techos de tanques solo con el palpador del hydroform haciendo barridos de scan C en la lámina inferior lo más cerca posible a la soldadura, como ya se le quito el escáner se puede acercarse bastante, esto dará valores del estado de la lámina inferior cerca a la soldadura y dará una idea aproximada de cómo está la zona bajo la soldadura y la zona adyacente.

Sin embargo, dado el espesor de las láminas soldadas se infiere que la zona afectada térmicamente es proporcional a este por lo que sigue sin obtenerse valores cuantitativos de los mínimos espesores remanentes.

4 MARCO METODOLÓGICO

Basados en las investigaciones antes realizadas y teniendo en cuenta que las configuraciones existentes y que venden las empresas dedicadas a proveer los equipamientos para inspecciones de mapeo de corrosión son desarrolladas para la inspección de tuberías principalmente, el primer problema a resolver es la configuración

física del escáner a utilizar ya que equipos como hydroform y sus equivalentes o la inspección con palpadores y zapatas planas separan los VPA de la unión soldada por lo menos una pulgada lo cual hace que la zona afectada térmicamente quede por fuera del umbral de inspección.

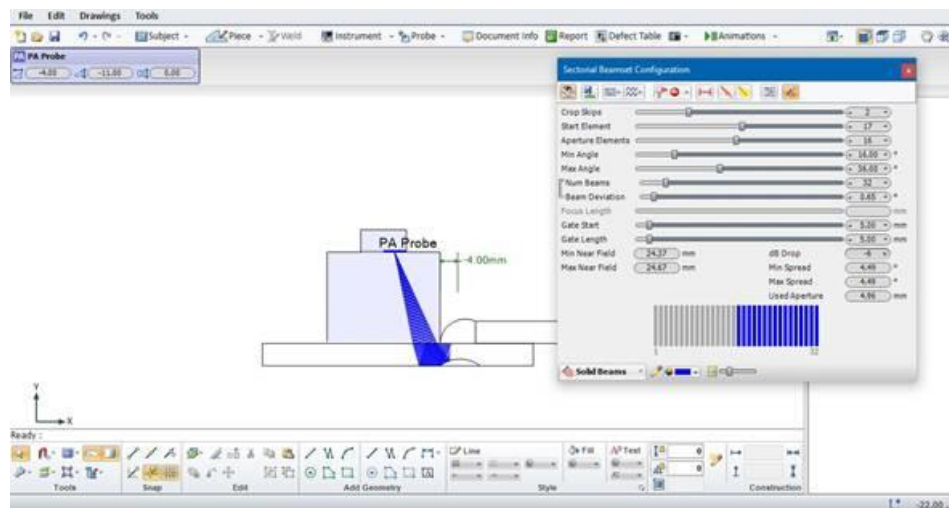
El segundo problema que se afronta es poder trabajar con ondas transversales en una superficie a la cual no se le puede remover el recubrimiento, esto debido a que las ondas transversales o también denominadas ondas de corte se configuran para viajar por un determinado ángulo en el material que para este caso sería acero al carbono, poder predecir con precisión el comportamiento de las ondas que viajan por el material depende del ángulo en el que están viajen ya que características de las ondas como lo son la dispersión y la absorción de energía por parte del material son relevantes para la información suministrada por el ensayo ultrasónico.

Generalmente no es aconsejable trabajar con ondas transversales en superficies con recubrimiento dado que estas pueden variar el ángulo con el cual entra y posteriormente viaja en el material; una de las soluciones que se le da a este impase es el trabajar con bloques de calibración que tengan un recubrimiento igual al del equipo que se va a inspeccionar.

Para el tipo de caracterización que se quiere hacer existe una variable en cuanto al recubrimiento y es que la forma en que se aplicó sobre la superficie de la unión soldada a filete y su zona afectada térmicamente hace que su espesor no sea homogéneo.

Basado en lo anteriormente expuesto en la figura 5 se muestra un plan de escaneo con palpador Olympus 10L32-A10 y zapata Olympus SA10-N55S-0L con la siguiente configuración.

Figura 5. Detección mediante PAUT y zapata plana



Fuente: Software NDT setup builders

Esta configuración se espera mejore la detección ya que se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Index offset más corto: En las anteriores configuraciones se usaron palpadores 5L32-A11 y 5L64-A12 por lo que se emplearon zapatas SA11 y SA12 las cuales tienen mayores dimensiones.
- Zapata plana (0L): Esta no tiene amortiguador angular, lo que significa menor separación de la soldadura, además que permite generar haces de ángulos con mayor verticalidad.
- Palpador 10L32-A10: este al contar con 32 elementos permite generar los pulsos desde estos últimos, además que a diferencia del 5L32-A11 el 10L32-A10 tiene un pitch de 0.3mm lo cual proporciona más ventajas al ser de elementos más pequeños como que permitiría usar mayor número de haces de inspección en la mitad de la distancia que lo haría un 5L32-A11 que tiene pitch de 0.6mm además de que también cuenta con mayor resolución.
- Inspección sobre recubrimiento: Uno de los problemas principales de trabajar sobre recubrimientos es hacerlo con ondas transversales ya que la pintura nos puede modificar el ángulo de los haces, es por eso por lo que esto no presenta mayor problema en los mapeos de corrosión porque se trabajan en ángulos a 0 grados; el plan de escaneo propuesto tiene ángulos cercanos a los 0 grados.

Empleando la anterior configuración se logró realizar una inspección adyacente bastante cercana a la soldadura ya que la separación fue de solo 5 mm, pero se usaron únicamente ondas longitudinales; las ondas transversales no fueron efectivas ya que al realizar la simulación computarizada no se podía tener en cuenta el estado superficial del recubrimiento del tanque debido a su recubrimiento el cual presentaba muchas irregularidades en su aplicación, como salpicaduras, especialmente en la zona de interés la cual es la más cercana a la soldadura.

Se realiza una segunda configuración para la cual no se puede obtener una simulación computarizada debido a que requiere realizar una modificación a una zapata Olympus SA12-0L, en la cual se realizan unos agujeros para el anclaje del palpador a 9 mm axialmente de los originales; esto con el propósito de que el palpador finalice físicamente en el mismo lugar que lo hace la zapata y así las configuraciones de haces longitudinales se acerquen a la unión soldada tanto como la zapata lo cual permitirá obtener un mapeo de corrosión en la zona afectadamente.

Dado la efectividad de la anterior configuración fue posible la caracterización del mecanismo de daño obteniendo valores cuantitativos reales de la zona afectada termicamente el desarrollo de la monografía se va a basar en los cálculos derivados de estos resultados, pero también se va a tener en cuenta información recolectada de inspecciones anteriores esto con el propósito de determinar las diferencias en la afectación de los fluidos contenidos en el tanque en distintas áreas de este como es en el techo, cuerpo y fondo.

Los cálculos van a ser basados en el estándar API 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, debido a que se trata de un tanque en servicio.

Otro aspecto que se va a tratar es el del recubrimiento y su posterior análisis de falla ya que debido a los defectos suscitados por malas prácticas en la aplicación de este es por las que aun hoy en día se encuentran mecanismos de daño activos.

5 DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA

5.1 Descripción del Equipo

Características del activo (Ver Tabla 1)

Tabla 1. Características del tanque de almacenamiento de crudo.

TIPO DE EQUIPO	TANQUE SOLDADO DE TECHO CÓNICO SOPORTADO (FIJO)
Servicio	Almacenamiento de crudo
Fluido	Crudo producido deshidratado
Año de fabricación	2004
Código de construcción	Estándar original API 650 apéndice A
Año de reparación	Reconstrucción del techo completada 2013
Código de reparación	Reconstruido de acuerdo con API 653
Diámetro / altura nominal	40 ft / 24 ft
Capacidad nominal	5000 BI
Nivel de diseño de líquido	22 ft (24 ft en placa original del tanque)
Gravedad específica de diseño	1
Temperatura de diseño	150°F (condición original de diseño)
Máxima temperatura de operación	160°F (placa de identificación)
Presión de diseño y operación	Atmosférica
Cuerpo	4 anillos en material ASTM 283 Gr. C Espesor 3/16 in para todos los anillos
Techo	Material reparación ASTM A36 Gr. C Espesor 3/16 in
Fondo	Material ASTM A36 Gr. C Espesor 1/4 in
Tolerancia de corrosión	Cuerpo: 0.079 in Fondo: 0.150 in
Recubrimiento interno	Epoxifenólico

TIPO DE EQUIPO	TANQUE SOLDADO DE TECHO CÓNICO SOPORTADO (FIJO)
Recubrimiento externo	Original: Anticorrosivo, barrera epóxica y esmalte de poliuretano Reparación: Autoimprimante epóxica Sika serie 100 y acabado de poliuretano
Tipo de fundación	Anillo de concreto
Tiempo de servicio	Cuerpo:13 años Fondo:13 años Techo:7 años
Sistema de protección catódica	Externo por corriente impresa

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

5.2 Determinación de los Mecanismos de Corrosión

5.2.1 Monitoreo de Gases en Techos de Tanques

El mes de agosto de 2016 se realizó el último monitoreo de gases en la fase gas del tanque de almacenamiento de crudo, utilizando tubos Dräger de corta duración. El muestreo del gas se realiza en una boquilla de techo, succionando con una bomba a través del tubo de muestreo, con lo que las sustancias absorbidas reaccionan colorimétricamente con los reactivos de los tubos.

En la tabla 2 se especifican el historial de los datos obtenidos y las fechas en que fueron recolectados:

Tabla 2. Monitoreo de gases.

TIPO DE GAS	02-ago-16	29-jun-15	12-dic-14
H ₂ S	6ppm	<0.2ppm	<0.2ppm
O ₂	5%	9%	
H ₂ O	>40 ppm	15ppm	15ppm
CO ₂	0.5%	<0,1%	<0,1%

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

Las concentraciones de ácido sulfhídrico detectadas en el primer monitoreo (sulfuro de hidrógeno o H₂S) son moderadas teniendo en cuenta que el campo produce pocas trazas de gas, por lo tanto, se presume que estas concentraciones de gas son el resultado de la acumulación en los techos de trazas de gas producido, proceso facilitado por la densidad del gas que es mayor a la del aire.

La acumulación de gas H₂S en estas unidades de proceso que puede ocasionar problemas de corrosión, ampollamiento de recubrimiento, agrietamiento de material y problemas de salud con tiempos de exposición prolongados al personal operativo.

El dióxido de carbono CO₂ se encuentra en bajas concentraciones y como la presión en el techo del tanque es atmosférica tiene presiones parciales bajas, clasificando el fluido con un grado de corrosividad bajo.

5.2.2 Análisis de Fluidos

Los fluidos asociados al tanque de almacenamiento de crudo producido no están incluidos en el programa de monitoreo fisicoquímico y microbiológico de estación Jaguar debido a que se espera una proporción muy baja de fase acuosa y por lo tanto un fluido con baja corrosividad.

5.2.3 Inspección de Sistema de Protección Catódica

El tanque tiene como sistema de prevención de fuga (RPS) el sistema de protección catódica (SPC) del fondo del tanque y el recubrimiento en el interior. La Unidad Rectificadora de Protección Catódica (URPC) se encuentra en buen estado y suministra energía a los sistemas de protección catódica de dos tanques de crudo producido de similares características.

Como se muestra en la tabla 3, los potenciales estructura-suelo del tanque de almacenamiento de crudo cumplen el segundo criterio NACE de protección de acuerdo con la norma NACE RP0193 Un potencial de polarización igual o más negativo que -850 mV respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado.

Tabla 3. Potenciales estructura-suelo tanque de almacenamiento de crudo.

FECHA	PUNTO 1 (mV/CSE)		PUNTO 2 (mV/CSE)		CORRIENTE TOTAL	DENSIDAD (mA*m ²)
	ON	OFF	ON	OFF		
20-ene-16	-348	-348	-387	-387	0	0
03-may-16	-3500	-870	-3603	-907	7,8	66,83
10-jul-16	-5507	-1043	-5492	-1011	3,1	26,56
16-oct-16	-5666	-1095	-5666	-1095	3,1	26,56
12-feb-17	-5583	-1099	-5583	-1099	3,53	30,25
24-abr-17	-5479	-1012	-5471	-1012	1,83	15,68
22-jul-17	-5472	-1015	-5471	-1010	1,83	15,68

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

5.2.4 Monitoreo de Corrosión Interna

El programa de monitoreo de corrosión interna de la estación contempla el monitoreo gravimétrico del fluido de rebose que llega a los tanques de almacenamiento.

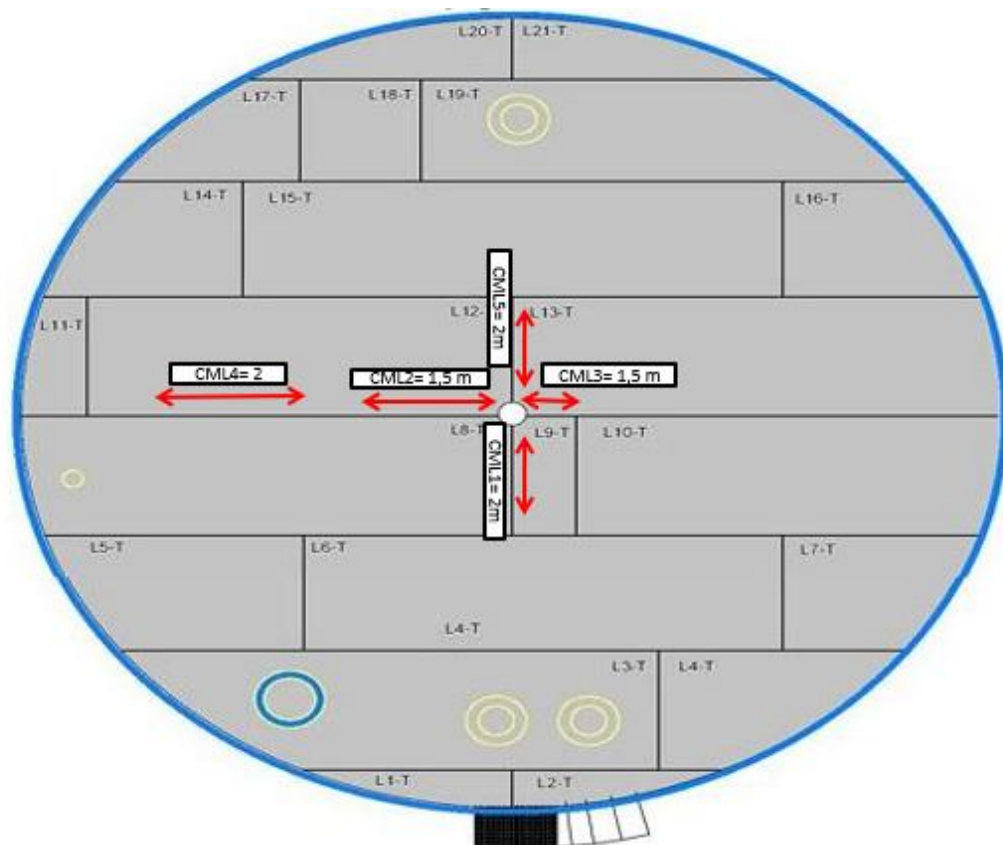
Históricamente no se ha detectado pérdidas significativas de espesor debido a que el fluido es crudo producido el cual no es agresivo.

5.3 Caracterización de los Mecanismos de Daño

5.3.1 Inspección de Tanque de Techo Cónico Soportado (fijo)

Se ejecuta un plan de inspección mediante scan C en octubre del año 2020 solo en el techo del tanque el cual tenía como meta determinar cuantitativamente los mecanismos de corrosión presentes en la zona afectada térmicamente por el calor de las juntas a solape-traslape producto de la unión de las láminas, a continuación, se puede ver la configuración del techo del tanque y las ubicaciones donde se realizaron los barridos:

Figura 6. Configuración del techo del tanque e inspecciones realizadas.



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos están consignados en la tabla 4, refieren a la inspección realizada en octubre de 2020 e incluyen el porcentaje de pérdida de material asumiendo que el espesor nominal de la lámina es 3/16 in (0,1875 in).

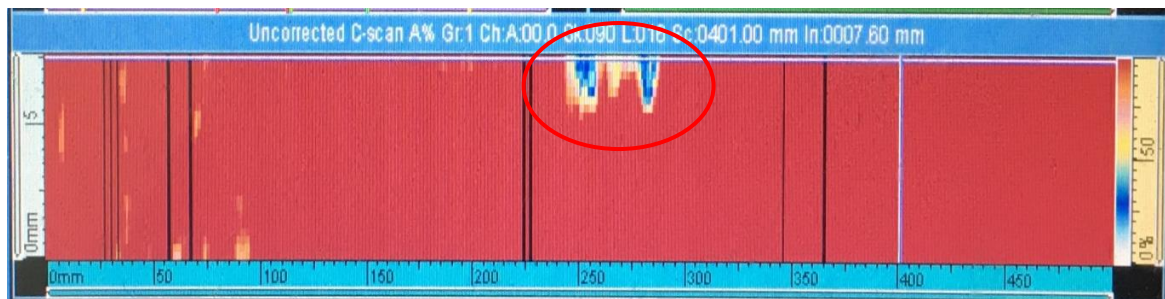
Tabla 4. Espesores mínimos por cada CML.

CML N°	UBICACIÓN	MÍNIMO ESPESOR (in)	PÉRDIDA DE ESPESOR %
1	L9-T	0,118	37%
2	L12-T	0,127	32%
3	L12-T	0,134	28%
4	L13-T	0,099	47%
5	L13-T	0,135	28%

Fuente: Autor

La figura 7 es la representación C scan del mapeo de corrosión realizado en la lámina L13-T del techo del tanque con el propósito de determinar los mecanismos de daño por pérdida de espesor; señalado en el círculo rojo se observa visualmente la morfología de la corrosión, esta imagen corresponde a un barrido hecho totalmente pegado a la unión soldada por lo que se infiere que la configuración utilizada fue exitosa.

Figura 7. Mapeo de corrosión zona afectada térmicamente.



FUENTE: Software Tomoview

Con el fin de determinar si realmente la ausencia de recubrimiento en la zona afectada térmicamente de las uniones soldadas es la causa de las pérdidas de espesor halladas; en la presente monografía se presentan los resultados de inspecciones realizadas en cuerpo y boquillas las cuales se encuentran expuestas a los mismos fluidos y condiciones que el techo.

5.3.2 Inspección Visual Externa del Techo

- Se identifica que gran parte del recubrimiento externo presenta tizamiento.

- En la lámina L3-T, en la brida de unión del manhole con la válvula EPRV se presenta desprendimiento de recubrimiento con presencia de corrosión.
- Láminas 1, 2, 3 y 4 presentan contaminación con el fluido del proceso.
- En el anillo perimetral del techo se presenta ampollamiento que generó el agrietamiento, filtración de agua y corrosión somera en la soldadura, tanto en la parte inferior como superior del anillo.
- Láminas 15, 16, 13 y 12 presenta ampollas por sobre espesor de capa originadas durante la aplicación del recubrimiento.
- El deterioro en el recubrimiento de las barandas es atribuible al periodo de funcionamiento del tanque.
- Los espárragos y tuercas de las bridas presentan oxidación con trazas de herrumbre, que pueden afectar a futuro la condición mecánica de los pernos, inclusive se presenta la misma condición en la brida de la LV a pesar de que tiene instalado kit de aislamiento.
- En la brida del LIT, el kit de aislamiento dieléctrico se encuentra incompleto.
- Se evidencia soldadura de amarre que no fue removida durante la instalación y construcción del techo.

5.3.3 Medición de Espesores de Película Seca en el Recubrimiento del Techo

Se realiza la medición de espesor de película seca del recubrimiento actual a las 21 láminas del techo, encontrándose que el espesor de pintura es muy similar en toda la superficie de las láminas. L1-T es la lámina que presenta mayor espesor con un promedio de 28,57 mils, el promedio espesores más bajos lo tiene la lámina L6-T con 15,23 mils. El recubrimiento general del tanque presenta un espesor promedio de 19,30 mils, por lo que se puede determinar que el esquema de recubrimiento actual está cumpliendo el esquema requerido de 16 mils, a pesar del efecto de tizamiento durante los años de servicio. La tabla 5 muestra los valores tomados en cada lámina y el espesor promedio de cada una de ellas.

Tabla 5. Película seca en recubrimiento del techo.

LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)	LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)	LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)
L1-T	14,5	15,23	L8-T	16,1	17,90	L15-T	17,3	20,63
	15,9			19,3			19,3	
	15,3			18,3			25,3	
L2-T	14,3	14,83	L9-T	19,7	17,93	L16-T	16,6	16,07
	17			16,8			10,6	
	13,2			17,3			21	

LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)	LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)	LAMINA DEL TECHO	ESPESOR (mils)	PROMEDIO (mils)
L3-T	12,9	15,70	L10-T	15	17,70	L17-T	13,9	15,67
	18,6			17,5			17,6	
	15,6			20,6			15,5	
L4-T	22,7	20,93	11-T	20	19,90	L18-T	13,9	15,67
	16,5			19,1			17,6	
	23,6			20,6			15,5	
L5-T	11,3	16,63	L12-T	26,2	23,27	L19-T	21,4	18,57
	15,6			21,8			18,8	
	23			21,8			15,5	
L6-T	13,6	15,23	L13-T	23,7	21,20	L20-T	22,3	23,67
	22,1			16,6			27,1	
	10			23,3			21,6	
L7-T	20,6	23,23	L14-T	13,3	15,30	L21-T	24,6	21,23
	25,2			14,1			17,6	
	23,9			18,5			21,5	

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

5.3.4 Medición de Adherencia de Recubrimiento en Cuerpo

Se realizó prueba de adherencia al esquema de pintura existente en áreas con pintura original y sana, no se realiza en áreas con evidencia de levantamiento del recubrimiento ni reparaciones ya que por inspección visual el esquema esta ya contaminado por filtración de agua y óxido del sustrato. Los resultados se realizan con un muestreo de 6 dados pegados en el cuerpo para verificar el estado del esquema de adherencia existente en el tanque, que para el caso es pintura epóxica curadas con amina con preparación de superficie mínimo a grado comercial mediante chorreado de arena, el cual es evaluado de acuerdo con la norma NTC-3951. Los resultados de la medición de adherencia están consignados en la tabla 6.

Tabla 6. Adherencia en recubrimiento del cuerpo.

DESCRIPCIÓN	LÁMINA	PRESIÓN	CAPA B	CAPA A-B	RESULTADO
Pintura original	L1-1	400 PSI	25% COHESIÓN	10% ADHERENCIA	OK
Pintura original	L1-2	400 PSI	65% COHESIÓN	5% ADHERENCIA	OK
Pintura original	L2-1	400 PSI	25% COHESIÓN	15% ADHERENCIA	OK
Pintura original	L6-4	500 PSI	85% COHESIÓN		OK

DESCRIPCIÓN	LÁMINA	PRESIÓN	CAPA B	CAPA A-B	RESULTADO
Pintura original	L7-1	400 PSI	20% COHESIÓN	3% ADHERENCIA	OK
Pintura original	L7-3	400 PSI		60% ADHERENCIA	OK

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

Se determina que gran parte de los resultados de adherencia en el esquema de pintura es por cohesión en la capa del acabado y presión mayor a la requerida por la norma, por lo que se puede concluir que el esquema de recubrimiento cumple con las adherencias requeridas.

5.3.5 Medición de Espesores en Boquillas

Se realiza la medición de espesores por ultrasonido Scan-A en 10 boquillas en el primer anillo y a 4 boquillas en el techo, para un total de 14 boquillas, incluyendo los manhole, las tablas 7 y 8 relaciona los valores de las inspecciones realizadas, así como su promedio y porcentaje de pérdida del techo y cuerpo del tanque respectivamente.

Tabla 7. Valores Scan A boquillas del techo.

BOQUILLA	DIAMETRO (in)	ESPESORES TOMADOS EN LAS BOQUILLAS DEL TECHO (in)							
		ESPESOR NOMINAL	CML				MIN	REQUERIDO	MAYOR % PERDIDA
			1	2	3	4			
EPRV	22	0,25	0,249	0,248	0,249	0,248	0,248	0,1	1%
LIT	8	0,322	0,345	0,345	0,328	0,323	0,323	0,1	0%
MIRILLA	8	0,322	0,328	0,328	0,327	0,327	0,327	0,1	-2%
PVV	8	0,322	0,317	0,317	0,358	0,317	0,317	0,1	2%

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

Tabla 8. Scan A boquillas del cuerpo del tanque.

BOQUILLA	DIÁMETRO (in)	ESPEORES TOMADOS EN LAS BOQUILLAS DEL CUERPO DEL TANQUE (in)							
		ESPESOR NOMINAL	CML				MIN	REQUERIDO	MAYOR % PERDIDA
			1	2	3	4			
A	24	0,25	0,226	0,247	0,248	0,248	0,226	0,1	10%
B	6	0,432	0,434	0,44	0,41	0,405	0,405	0,1	6%
C	3	0,3	0,293	0,296	0,303	0,281	0,281	0,1	6%
D	4	0,337	0,332	0,357	0,343	0,332	0,332	0,1	1%
E	4	0,337	0,357	0,342	0,334	0,334	0,334	0,1	1%
F	24	0,313	0,312	0,314	0,314	0,312	0,312	0,1	0%
G	4	0,337	0,341	0,344	0,347	0,341	0,341	0,1	-1%
H	4	0,337	0,327	0,352	0,342	0,327	0,327	0,1	3%
I	6	0,432	0,415	0,414	0,436	0,414	0,414	0,1	4%
J	6	0,562	0,579	0,595	0,596	0,579	0,579	0,1	-3%

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

De los resultados obtenidos se tiene que la máxima pérdida de espesor lo registra la boquilla A (Manhole) del cuerpo con 9,6 % de pérdida de espesor respecto a su espesor nominal.

5.3.6 Medición de Espesores en el Cuerpo del Tanque

Se realiza medición de espesores en las láminas del cuerpo del tanque en las cuales no se observan pérdidas relevantes, la tabla 9 describe los valores más representativos.

Tabla 9. Scan A en láminas del cuerpo del tanque.

CML	UBICACIÓN	ESPESOR MÍNIMO	ESPESOR PROMEDIO	PORCENTAJE DE PÉRDIDA
1	ANILLO 1, LAMINA 7	0,189	0,191	1%
2	ANILLO 3 LAMINA 7	0,188	0,191	2%
3	ANILLO 4 LAMINA 6	0,167	0,177	6%

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

5.4 Evaluación de Integridad Mecánica

El análisis de integridad mecánica de un tanque construido bajo el código API 650 está basado en la norma API 653 "Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction", en la tabla 10 se muestra el historial de inspección previo al desarrollo de esta monografía.

Tabla 10. Historial de inspección del tanque de almacenamiento de crudo.

AÑO	INSPECCIÓN	RESULTADOS	
2012	Inspección visual	Se identifican cavidades entre pestañas y la base del concreto, recubrimiento externo con ampollamiento, falta de espárragos en ciego, tramo de tubería mal soportada, válvulas de alivio sin registros de calibración.	
2012	Medición de espesores	Espesores mínimos en cuerpo y techo	Anillo 1: 0,203 in
			Anillo 2: 0,202 in
			Anillo 3: 0,203 in
			Anillo 4: 0,203 in
			Techo: 0,188 in
2013 enero	Inspección API:	Se estableció presencia de perforaciones y ondulaciones en las láminas del techo. Se identifica una buena condición de las láminas del fondo por inspección MFL, El recubrimiento de fondo presenta buen estado y en el interior del cuerpo se observa desprendimiento de aproximadamente 10 pulg2. Se evidencia daños en recubrimiento exterior de base y áreas adyacentes a soportes. Prueba de adherencia en recubrimiento externo resultó en 972psi.	Fondo: 0,238 in
	MFL		Anillo 1: 0,190 in
	Cámara de vacío		Anillo 4: 0,183 in
	Ultrasonido		
	Inspección visual		
2013 marzo	Aseguramiento de reparaciones mecánicas	Cambio de 11 láminas del techo en material ASTM A-36 de espesor de 3/16 in para un área total de 117 m2.	
		Preparación superficial con chorro abrasivo metal blanco NACE SSPC SP5 en fábrica para superficie interna y chorro abrasivo a grado comercial NACE SSPC SP2 en campo para juntas y reparaciones.	
		Recubrimiento interior del techo capa SIKA imprimante epóxico rojo aplicada a láminas en fábrica hasta 6 mils, en campo se aplican 10 mils de recubrimiento auto imprimante epóxico SIKA serie 100.	

AÑO	INSPECCIÓN	RESULTADOS					
		Recubrimiento exterior del techo capa de SIKA imprimante epóxico rojo aplicada a láminas en fabrica hasta 4 mils, en campo se aplica 10 mils de recubrimiento auto imprimante epóxico SIKA serie 100 y 3 mils de esmalte uretano SIKA serie 36, se aplica con rodillo y brocha.					
		Reparaciones en superficie interna y externa del cuerpo realizadas con 10 mils de recubrimiento auto imprimante epóxico SIKA serie 100 más de 3 mils de esmalte uretano SIKA serie 36 para la superficie externa.					
		No se realizan reparaciones en el fondo del tanque.					
2013	Medición de espesores	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Espesores mínimos en cuerpo.</td> <td>Anillo 2: 0,198 in</td> </tr> <tr> <td>Anillo 3: 0,198 in</td> </tr> </table>	Espesores mínimos en cuerpo.	Anillo 2: 0,198 in	Anillo 3: 0,198 in		
Espesores mínimos en cuerpo.	Anillo 2: 0,198 in						
	Anillo 3: 0,198 in						
2015	Ultrasonido scan C	<table border="1"> <tr> <td rowspan="4">Espesores mínimos en cuerpo y techo</td> <td>Anillo 1: 0,188 in</td> </tr> <tr> <td>Anillo 2: 0,178 in</td> </tr> <tr> <td>Anillo 5: 0,180 in</td> </tr> <tr> <td>Techo: 0,169 in</td> </tr> </table>	Espesores mínimos en cuerpo y techo	Anillo 1: 0,188 in	Anillo 2: 0,178 in	Anillo 5: 0,180 in	Techo: 0,169 in
Espesores mínimos en cuerpo y techo	Anillo 1: 0,188 in						
	Anillo 2: 0,178 in						
	Anillo 5: 0,180 in						
	Techo: 0,169 in						

Fuente: Información suministrada por el dueño del activo.

El deterioro severo por corrosión interna en las láminas del techo se evidenció en diciembre de 2012, por lo que en el cambio del techo se tomó muestras para análisis de falla, identificando como causa la formación de gotas de vapor de agua que se condensan en la superficie interna del techo del tanque, producto de temperaturas inferiores al punto de rocío en el interior de este, formando celdas por concentración de oxígeno. Las gotas que se forman en el techo del tanque son zonas húmedas que producen una diferencia de potencial electroquímico con las zonas que permanecen secas, la zona húmeda se establece como ánodo y la seca como cátodo, produciéndose una corriente de electrones desde la parte húmeda a la seca, generando corrosión.

5.5 Cálculos de Integridad Mecánica

5.5.1 Criterios de Aceptación

Para establecer el estado de integridad mecánica del tanque de almacenamiento de crudo producido, se debe analizar los espesores mínimos detectados por inspección y compararlos con los siguientes criterios establecidos en el código API 653.

Fondo: Mínimo espesor para reparación o cambio de lámina es 0,1in, tabla 4,4 API 653. La última inspección de fondo se realizó en 2013 sin identificar pérdidas de espesor relevantes.

Cuerpo: El espesor mínimo para el cuerpo completo se calcula con una fórmula en función del diámetro, altura, gravedad específica del fluido y propiedades del material. En el siguiente capítulo se muestra los cálculos realizados donde se concluye que las láminas del cuerpo cumplen con los requerimientos del código.

Techo: Láminas deben ser reemplazadas o reparadas cuando presentan un espesor promedio menor de 0,09 in (2,28 mm) en cualquier área del techo de 100 pulg² de acuerdo con parágrafo 4.2.1.2 de API 653.

5.5.2 Cálculo de Espesores Mínimos en Cuerpo y Techo

A continuación, se presenta los cálculos del espesor mínimo aceptable t_{min} para cuerpo completo de tanques soldados, establecido en norma API 653 parágrafo 4.3.3.1 (a):

$$t_{min} = \frac{2.6 * (H - 1) * D * G}{S * E} = 0,109 \text{ in}$$

H = Altura desde el fondo hasta el máximo nivel del líquido = 22 Ft.

D = Diámetro del tanque = 40 Ft.

G = Gravedad específica del producto = 1.

S = Máximo esfuerzo permisible en anillos 1 y 2 = 23600 PSI para material A283-C (Tabla 4.1 API 653).

E = Eficiencia de junta = 0,85 para tanques construidos con norma API 650 Apéndice A y spot por RT (Tabla 4.2 API 653).

5.5.3 Velocidad de Corrosión

Para calcular la velocidad de corrosión real o a corto plazo, se debe tener el espesor anterior $t_{previous}$ tomado en una inspección anterior realizada en el mismo sitio donde se mide el espesor actual o espesor medido en el cuerpo $t_{med} = t_{actual}$, de acuerdo con las ecuaciones establecidas en API RP 575 numeral 6.2.

$$Velocidad \ de \ corrosi3n = \frac{t_{previous} - t_{actual}}{tiempo \ entre \ t_{previous} \ y \ t_{actual}}$$

$$Velocidad \ de \ corrosi3n \ interna \ cuerpo = \frac{t_{nom} - t_{med}}{tiempo \ de \ servicio} = 1,58 \text{ mpy}$$

t_{nom} = Espesor nominal = 3/16in = 0,1875in.

t_{med} = Mínimo espesor medido en el cuerpo = 4,24 mm = 0,167in.

Tiempo de servicio = 13 años hasta el momento de la inspección en agosto de 2017.

$$\text{Velocidad de corrosión interna techo} = \frac{t_{nom} - t_{med}}{\text{tiempo de servicio}} = 12,64 \text{ mpy}$$

t_{nom} = Espesor nominal = 3/16in = 0,1875in.

t_{med} = Mínimo espesor medido en el techo = 2,52 mm = 0,099 in.

Tiempo de servicio = 7 años desde el cambio de techo realizado en 2013 hasta inspección en 2020.

No se evidencia mecanismos de adelgazamiento severos en la superficie externa del techo y cuerpo, por lo que sus velocidades de corrosión externa son 0 mpy.

En inspección MFL realizada en 2013 no se identificó pérdidas relevantes de espesor en el fondo, por lo que la velocidad de corrosión en fondo para 2013 es de 0 mpy.

La velocidad de corrosión interna localizada del cuerpo se clasifica como BAJA de acuerdo con criterios de a NACE RP0775-2005 (norma para cupones de corrosión).

La velocidad de corrosión interna localizada del techo (12,64 mpy) se clasifica como SEVERA, la cual se observa en la tabla 11, identificando que la fase gaseosa del tanque es agresiva y se generó un deterioro prematuro en el recubrimiento adyacente a las juntas instalado en 2013.

Tabla 11. Clasificación de corrosividad en cupones según tabla 2 NACE RP0775-2005

Clasificación corrosividad	Velocidad de corrosión promedio (mpy)	Velocidad de picado máximo (mpy)
Baja	< 1,0	< 5,0
Moderada	1,0 - 4,9	5,0 - 7,9
Alta	5,0 - 10,0	8,0 - 15
Severa	> 10,0	> 15

Fuente: NACE RP0775-2005

Es posible que el techo no estuviera expuesto al fenómeno de corrosión durante los 7 años de servicio y la velocidad de corrosión real sea mayor; Lo anterior porque el recubrimiento inicialmente se esperaba en buen estado.

5.5.4 Cálculos de Vida Remanente

Los cálculos de vida remanente del cuerpo se realizan de acuerdo con las ecuaciones establecidas en API RP 575 numeral 6.2.

$$\text{Vida remanente cuerpo} = \frac{t_{actual} - t_{min}}{\text{velocidad de corrosión}} = 36,7 \text{ años}$$

t_{actual} = t_{med} = Mínimo espesor medido en el cuerpo = 4,24 mm = 0,167in

t_{min} = Espesor mínimo requerido = 0,109in en cuerpo completo

Velocidad de corrosión en cuerpo = 1,58 mpy.

Los cálculos de vida remanente en techo se realizan asumiendo que el espesor mínimo requerido t_{min} equivale al criterio establecido en la norma de espesor promedio menor de 0,09 pulg (2,28 mm) en cualquier área del techo de 100 pulg². Con estos criterios la vida remanente del techo es de 0,57 años. Teniendo en cuenta que el adelgazamiento identificado está localizado en la zona adyacente a las juntas, se calcula la vida remanente asumiendo que el espesor mínimo requerido es 0 mm (Equivalente a una perforación puntual del techo).

$$\text{Vida remanente techo} = \frac{t_{actual} - t_{min}}{\text{velocidad de corrosión}} = 7,8 \text{ años}$$

$t_{actual} = t_{med} =$ Mínimo espesor medido en el techo = 2,52 mm = 0,099 in

$t_{min} =$ Espesor mínimo requerido = 0 in en techo

Velocidad de corrosión en techo = 12,64 mpy.

5.6 Intervalos de Inspección

Inspección externa La inspección externa debe ser efectuada al menos cada 5 años o RCA/4N años (donde RCA es la diferencia entre el espesor medido en el cuerpo y el mínimo espesor requerido en mils, N es la velocidad de corrosión en mpy), de acuerdo con lo establecido en el numeral 6.3.2.1 de la norma API 653.

5.6.1 Inspección Externa

$$\text{Intervalos de inspección externa} = \frac{RCA}{4N} = \frac{t_{med} - t_{min}}{4N} = 9,2 \text{ años}$$

$t_{med} =$ Mínimo espesor medido en el cuerpo = 4,24 mm = 0,167 in

$t_{min} =$ Espesor mínimo requerido = 0,109 in

N = Velocidad de corrosión en cuerpo = 1,58 mpy

El intervalo de inspección externa no debe ser mayor de 5 años (agosto 2022)

5.6.2 Medición de Espesores

Cuando la velocidad de corrosión no es conocida, se debe realizar la medición de espesores en cuerpo cada 5 años, cuando la velocidad de corrosión se conoce, el máximo intervalo para realizar medición de espesores debe ser el menor entre RCA/2N y 15 años de acuerdo con el numeral 6.3.3.2 de API 653.

$$\text{Intervalos de inspección externa} = \frac{RCA}{2N} = \frac{t_{med} - t_{min}}{2N} = 18,4 \text{ años}$$

El intervalo de inspección externa no debe ser mayor de 15 años (octubre 2035)

5.6.3 Inspección Interna

El intervalo para inspección interna se controla por las velocidades de corrosión en fondo no debe superar los 20 años. También se puede definir a partir de procedimientos RBI (Sin exceder 25 años) de acuerdo con lo establecido en el numeral 6.4.2.2. de la norma API 653.

Para el tanque de techo cónico soportado (fijo), la velocidad de corrosión en fondo identificada en 2013 es de 0 mpy y en el informe de evaluación API realizado en 2013 se propone como próxima fecha de inspección intrusiva el mes de diciembre de 2033.

Se determina que el próximo intervalo de inspección interna es de 5 años (Inspección intrusiva en octubre de 2025) por las siguientes razones:

- La fecha para inspección interna propuesta en 2013 es mayor que la vida remanente del techo del tanque calculado en 2020 (7,8 años).
- La cinética de las velocidades de corrosión puede variar con el tiempo.
- El ambiente en la fase gaseosa del tanque es muy agresivo.
- El mecanismo de daño interno solo se puede mitigar con la aplicación de un recubrimiento de alto desempeño, por lo tanto, la corrosión seguirá avanzando.
- El mecanismo de daño por corrosión interna se concentra en las zonas afectadas por el calor de las juntas en techo, estas pueden inspeccionarse utilizando las configuraciones propuestas en esta monografía, sin embargo, se debe tener presente el estado del recubrimiento ya que hallazgos como lo son ampollamiento o descascarado pueden causar interferencias.
- Se propone un intervalo para la próxima inspección interna menor a la vida remanente en el techo del tanque.

Debido a la morfología del mecanismo de daño identificado en zonas afectadas por el calor del techo, es necesario realizar una caracterización completa de corrosión a corto plazo que se puede realizar con inspección mediante ultrasonido Phased Array presentación scan C pero de ser posible al 100% de las zonas afectadas térmicamente por las soldaduras o al menos a las que se tenga acceso teniendo en cuenta el tipo de escáner que se vaya a utilizar.

5.7 Mecanismos de Daño Activos

Debido a todo lo anteriormente expuesto y al hecho de que no se identifican mecanismos de daño activos en la superficie externa del tanque y que en la parte interna el cuerpo y el fondo no presentan pérdidas relevantes, es el techo y puntualmente el área afectada térmicamente por el calor los que conservan mecanismos de daño activos.

El cambio de láminas de techo se realizó en 2013 debido al alto grado de deterioro por corrosión interna, que se presentó por la formación de gotas de vapor de agua que se condensan en la superficie interna del techo del tanque, producto de temperaturas inferiores al punto de rocío en el interior de este, formando celdas por concentración de oxígeno. En el techo nuevo ya se identificó pérdidas de espesor significativas en las zonas adyacentes a las juntas (zona afectada por el calor), pese a que en el 2013 se realizó la aplicación de recubrimiento interno. Se evidenció un mínimo espesor de 2,52 mm que corresponde a una pérdida de 47% respecto al espesor nominal.

En el mapeo de corrosión realizado a las láminas del techo no se identifica pérdidas significativas en áreas alejadas a las juntas, por lo que se concluye que el recubrimiento interno aplicado en 2013 ya presentó un deterioro prematuro en áreas adyacentes a juntas.

El ambiente húmedo en el techo del tanque permite la existencia de un electrolito en el cual se absorben los gases presentes en su interior y se desarrollan los fenómenos corrosivos. Las concentraciones de humedad en la fase gaseosa son altas de acuerdo con lo evidenciado por los monitoreos de gases realizados, con valores desde 15 ppm y que superan los 40 ppm. Se espera bajo grado de acidez de la humedad condensada en el techo del tanque debido a que el ácido sulfhídrico H₂S se presenta en trazas (máximo 6 ppm).

El principal mecanismo de daño identificado es la corrosión por oxígeno lo que concuerda con la morfología del daño inspeccionada en 2013, no obstante, se identifica otros contaminantes como H₂S en baja concentración que contribuyen a la corrosión interna en menor medida. El oxígeno se encuentra en altas concentraciones (hasta 9%) en los monitoreos de gases realizados, además se permite su fácil renovación por operar de manera abierta y daños en sello de escotilla para medición de nivel. Estos mecanismos de daño se verifican con el análisis realizado en 2013 a los residuos de corrosión interna, en los cuales se identificó un 88% de óxidos de hierro y 11% de sulfuro de hierro.

El dióxido de carbono CO₂ se presenta en baja concentración (hasta 0,5%), por lo que no representa una amenaza a la integridad del tanque.

El mecanismo de daño de corrosión atmosférica se identifica de manera activa en los sitios de techo y cuerpo donde se presentan daños en el recubrimiento externo y permiten la exposición del sustrato. La agresividad de este mecanismo de daño es muy baja y solo genera oxidación superficial, no obstante, en los sitios con desprendimiento o ampollamiento se puede generar atrapamiento de agua generando un modo de corrosión externa por rendija o “crevice corrosión”.

La corrosión atmosférica de la estación históricamente no ha sido un problema para la Integridad Mecánica de los activos de en esta área, debido a que la atmósfera del Llano es poco agresiva, no hay focos de industria que puedan generar lluvias ácidas y no hay posibilidad de atmósferas salinas propias de la costa.

5.8 Análisis de Falla del Recubrimiento

No se espera daños en el recubrimiento interno de cuerpo y fondo debido a la baja agresividad del crudo deshidratado y su bajo corte de agua. A continuación, se analiza los daños en recubrimiento externo del tanque y recubrimiento interno del techo

5.8.1 Deterioro del Recubrimiento Externo del Cuerpo

A continuación, se analiza los principales factores para el deterioro del recubrimiento externo del cuerpo, el cual es el esquema original y desconocido del tanque (Anticorrosivo, barrera epóxica y esmalte de poliuretano) más las reparaciones puntuales realizadas durante mantenimientos con autoimprimante epóxico Sika serie 100 y acabado de poliuretano Sika serie 36.

- Tiempo de servicio: El recubrimiento externo original presenta 13 años de exposición al ambiente.
- Daños en recubrimiento de láminas: Bastantes zonas con daño en el recubrimiento, en especial la parte perimetral inferior de las láminas del primer anillo se observa ampollamiento generalizado con agrietamiento y desprendimiento de recubrimiento. Algunos pinholes y agrietamiento en láminas con oxidación del sustrato metálico.
- Daños en recubrimiento de juntas: Desprendimiento en soldaduras de boquillas, ruanas y demás elementos del cuerpo. Ampollamiento en el recubrimiento en juntas de láminas y en todos los soportes soldados del tanque tales como medidor de nivel, escaleras, toma muestras y tubería de cableado. Esto evidencia una inadecuada preparación superficial en juntas, normalmente en los procesos constructivos de tanques, las láminas vienen pintadas de fábrica y en campo se aplica el recubrimiento de juntas.
- Sello de pestaña en fondo: Presenta desprendimiento y agrietamiento que permite la filtración de agua, posterior deterioro del recubrimiento de la parte inferior del primer anillo, luego corrosión tipo rendija en zonas deterioradas y oxidación en áreas con recubrimiento desprendido.
- Reparaciones: Se identificó ampollamiento en reparaciones del tanque. Es evidente que el recubrimiento en estas reparaciones realizadas después de 2014 quedó mal aplicado y sin control de calidad.

El esquema de recubrimiento externo del cuerpo requiere reparación completa por la cantidad y extensión de los daños encontrados. Algunos daños son generados por la filtración de agua en sello deteriorado de pestaña de fondo, otros daños corresponden a reparaciones realizadas sin el debido control de calidad y los demás daños son propios del tiempo de servicio prolongado que tiene el tanque.

Desde el punto de vista de integridad mecánica se podría retirar la totalidad del recubrimiento externo del tanque y no se afectaría la vida útil del equipo, teniendo en cuenta

que la corrosión atmosférica es poco agresiva en la estación, con esto se evitaría la corrosión tipo rendija o “crevice” que se forma bajo un recubrimiento deteriorado. Se sugiere aplicar un recubrimiento por estética.

5.8.2 Deterioro Prematuro Del Recubrimiento Externo Del Techo

El recubrimiento externo actual del techo fue aplicado durante el cambio de techo realizado durante 2013. A continuación, se describe el esquema utilizado:

- Preparación superficial con chorro abrasivo a grado comercial NACE SSPC SP6.
- Capa de Imprimante epóxico rojo de Sika aplicada a láminas en fábrica hasta 4 mils.
- Preparación superficial de área aledaña a juntas de manera manual NACE SSPC SP2.
- Aplicación de 10 mils de autoimprimante epóxico Sika serie 100 en toda la superficie del techo.
- Aplicación de 3 mils de esmalte de poliuretano Sika serie 36 a toda la superficie del techo. Método de aplicación de recubrimientos en campo con rodillo y brocha.
- Medición de espesores de película seca en esquema completo, espesor promedio 17,0 mils.
- Monitoreo permanente de condiciones ambientales. Área total de aplicación 117 m2.

A continuación, se analiza los principales factores para el deterioro del recubrimiento externo del techo, el cual duró 7 años en operación.

- Procedimiento de aplicación: La preparación superficial de las láminas en fábrica se realiza con sand blasting pero las juntas son preparadas manualmente, por lo que se tiene una mayor probabilidad de daño en el recubrimiento aledaño a las juntas. El método de aplicación en campo es con brocha y rodillo el cual puede afectar las propiedades de un recubrimiento.
- Daños en recubrimiento de juntas: Desprendimiento en el recubrimiento en brida de unión de manhole con EPRV. Ampollamiento y agrietamiento en recubrimiento de soldadura en anillo perimetral que permite filtración de agua. Esto evidencia una inadecuada preparación superficial en juntas que se realizó en campo.
- Daños en recubrimiento de láminas: Ampollamiento por sobre espesor en algunas láminas debido a un inadecuado proceso de aplicación de recubrimiento o control de calidad.
- Adherencias: Gran parte de la falla de adherencia en el esquema de pintura es cohesivo en la capa de Imprimante epóxico rojo, esta falla se da por algún problema asociado al producto o su preparación, tales como utilización de producto vencido mal almacenado, mezcla con proporción diferente de catalizador, uso de solventes convencionales para

dilución y limpieza (Sika requiere Cosmasolvente Epóxico) o no se permite el tiempo necesario para repinte.

- Cumplimiento de requerimientos de fabricante: El autoimprimante epóxico Sika serie 100 indica en su ficha técnica los siguientes requerimientos no cumplidos en la aplicación de áreas aledañas a juntas:
 - “En caso de que existan limitaciones para llevar a cabo la preparación a SP6, este producto se puede aplicar en superficies metálicas preparadas manual o mecánicamente (SSPC-SP2/ SSPC- SP3), sin embargo, estos métodos de preparación de superficie pueden afectar el desempeño del producto”.
 - “Para las costuras de soldaduras irregulares y ásperas, y otras áreas que no se hayan desbastado con pulidora, se recomienda realizar una aplicación previa del producto diluido en un 50% con Colmasolvente Epóxico referencia 958025 y aplicarlo con brocha repasando sobre la superficie: este tratamiento se puede recubrir después de transcurrida 1 hora como mínimo con el fin de evitar atrapamiento de solvente”.
 - “El producto se aplica con brocha, equipo sin aire con relación de bomba superior a 30:1. Cuando se aplique con brocha, esta debe ser de cerda animal y no de nylon”.

El esquema de recubrimiento externo del techo falló por una inadecuada preparación superficial en juntas, aplicación con brocha y rodillo, y problemas asociados con el imprimante epóxico rojo o su aplicación en fábrica que resultó en falla cohesiva.

5.8.3 Deterioro Prematuro Del Recubrimiento Interno Del Techo

El recubrimiento interno original del techo falló porque posiblemente fue mal seleccionado para el ambiente agresivo o porque fue mal aplicado, lo que eliminó la barrera existente y permitió la corrosión interna.

El recubrimiento interno actual del techo fue aplicado durante el cambio de techo realizado durante 2013. A continuación, se describe el esquema utilizado.

- Preparación superficial con chorro abrasivo a grado metal blanco NACE SSPC SP5.
- Capa de Imprimante epóxico rojo de Sika aplicada a láminas en fábrica hasta 6 mils.
- Preparación superficial de área aledaña a juntas de manera manual NACE SSPC SP2.
- Aplicación de 10 mils de autoimprimante epóxico Sika serie 100 en toda la superficie del techo.
- Método de aplicación de recubrimientos con rodillo y brocha.

- Medición de espesores de película seca en esquema completo, espesor promedio 14,04 mils.
- Monitoreo permanente de condiciones ambientales. Área total de aplicación 117 m2.

Se asume que el recubrimiento interno del techo presenta un deterioro prematuro en zonas afectadas por el calor de juntas soldadas, teniendo en cuenta las pérdidas de espesor identificadas en inspección realizada en estas zonas. A continuación, se analiza los principales factores para el deterioro del recubrimiento interno del techo, el cual duró 7 años en operación.

Procedimiento de aplicación: La preparación superficial de las láminas en fábrica se realiza con sand blasting pero las juntas son preparadas manualmente, por lo que se tiene una mayor probabilidad de daño en el recubrimiento aledaño a las juntas. El método de aplicación en campo es con brocha y rodillo el cual puede afectar las propiedades de un recubrimiento.

- **Esquema de recubrimiento:** En la superficie de las láminas se aplica en fábrica Imprimante epóxico rojo de Sika, pero en campo no se aplica este producto en las uniones soldadas, sino que se aplica autoimprimante epóxico Sika serie 100 en toda la superficie del techo, por lo tanto, en el área adyacente a las juntas se realiza un esquema de un producto y son zonas más susceptibles al deterioro que el resto de la superficie de láminas las cuales tienen un esquema de 2 productos.
- **Desempeño de recubrimiento externo en techo:** El esquema aplicado en la superficie externa del techo es similar al de la superficie interna, pero con una capa de acabado Sika serie 36. Este recubrimiento evidenció daños tales como ampollamiento, desprendimiento y agrietamiento, por lo que no se espera un buen desempeño del recubrimiento interno que soporta un ambiente más agresivo y es más difícil de aplicar por la posición en la aplicación y existencia de vigas.
- **Resultados de inspección:** La inspección por ultrasonido realizada 7 años después de la reparación del techo indica pérdidas de espesor significativas hasta 47% de pérdida respecto al espesor nominal en las zonas adyacentes a las soldaduras.
- **Cumplimiento de requerimientos de fabricante:** El autoimprimante epóxico Sika serie 100 indica en su ficha técnica los siguientes requerimientos no cumplidos para la superficie interna del techo:
 - “**Usos:** Como recubrimiento interior o exterior de tanques metálicos que contienen agua industrial, agua salada, productos livianos de petróleo, soluciones alcalinas, crudo de petróleo”.

La ficha técnica del producto no indica que fue diseñado para soluciones ácidas como las formadas en la condensación de humedad sobre el techo del tanque y posiblemente esté mal seleccionado para la fase gaseosa del tanque. Se requiere un producto de mejor desempeño como los recubrimientos tipo Epoxifenólico Novalac que se están aplicando actualmente en el campo.

- “Para superficies externas sometidas a ambientes altamente agresivos, se debe realizar la preparación de superficie a Grado Comercial SSPC-SP6, como mínimo. Para servicio en inmersión la preparación de la superficie debe ser realizada con chorro abrasivo a Grado Metal Blanco SSPC-SP5, estándar sueco (Sa3), ó Norma ICONTEC NREPORTE3895”.

No se cumple preparación superficial para servicio agresivo en áreas aledañas a la junta.

- “En caso de que existan limitaciones para llevar a cabo la preparación a SP6, este producto se puede aplicar en superficies metálicas preparadas manual o mecánicamente (SSPC-SP2/ SSPCSP3), sin embargo, estos métodos de preparación de superficie pueden afectar el desempeño del producto”.

La ficha técnica indica que el método de preparación superficial usado puede afectar el desempeño del producto.

“Para las costuras de soldaduras irregulares y ásperas, y otras áreas que no se hayan desbastado con pulidora, se recomienda realizar una aplicación previa del producto diluido en un 50% con colmasolvente epóxico referencia 958025 y aplicarlo con brocha repasando sobre la superficie: este tratamiento se puede recubrir después de transcurrida 1 hora como mínimo con el fin de evitar atrapamiento de solvente”.

No se realizó el procedimiento indicado por Sika para las soldaduras irregulares.

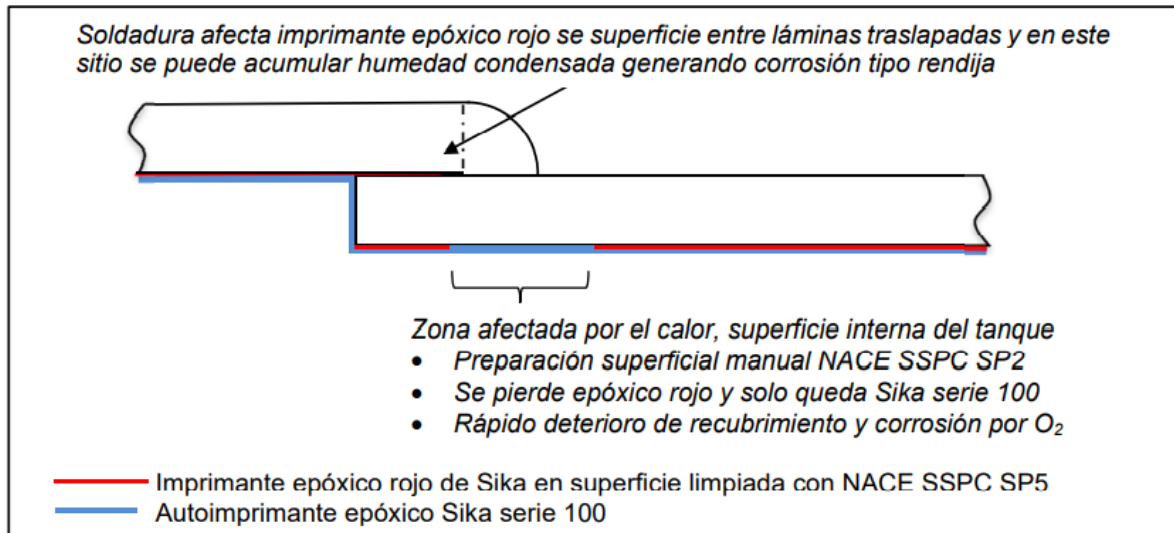
- “El producto se aplica con brocha, equipo sin aire con relación de bomba superior a 30:1. Cuando se aplique con brocha, esta debe ser de cerda animal y no de nylon”.

El recubrimiento en campo fue aplicado con brochas convencionales y rodillo.

Se determina que el recubrimiento aplicado al interior del techo presenta deterioro prematuro por una inadecuada preparación superficial en juntas, aplicación con brocha y rodillo, esquema de recubrimiento incompleto respecto al aplicado en el resto de la superficie de las láminas y selección de producto inadecuado para el ambiente agresivo en el interior del techo del tanque.

En el siguiente diagrama se muestra la configuración del recubrimiento en uniones traslapadas y permite entender las razones por las que la corrosión se concentra en zonas afectadas por el calor de juntas.

Figura 8. Esquema de recubrimiento en uniones traslapadas del tanque



FUENTE: Autor

6 CONCLUSIONES

El tanque de almacenamiento de techo cónico soportado (fijo) cumple con los espesores mínimos requeridos por el código API 653 en su techo, cuerpo y fondo, por lo tanto, su estado de Integridad Mecánica es el adecuado para continuar en servicio.

- El techo del tanque evidenció corrosión interna severa en inspección de 2012 con picaduras pasantes, por lo que fue cambiado completamente en marzo de 2013. El mecanismo de daño identificado fue “formación de gotas de vapor de agua que se condensan en la superficie interna del techo del tanque, producto de temperaturas inferiores al punto de rocío en el interior de este, formando celdas por concentración de oxígeno”.
- Se identifica pérdidas de espesor hasta de 47% por corrosión interna en la zona afectada por el calor de uniones soldadas en el techo del tanque reconstruido en 2013. El mínimo espesor evidenciado es de 2,52 mm, vida remanente de 7,8 años y la velocidad de corrosión interna es 12,64 mpy que se clasifica como SEVERA según criterios de NACE. Es necesario programar a corto plazo inspección directa o ultrasonido por inmersión a juntas traslapadas.
- En la inspección realizada al fondo durante 2013 no se identifica pérdidas significativas de espesor.
- No se idéntica pérdidas de espesor significativas en el cuerpo del tanque que presenta una vida remanente de 36,7 años.

- Los daños en sello de pestaña perimetral forman un espacio entre la pestaña del fondo y la base de concreto, permite la filtración de agua y forman un electrolito que puede fomentar la corrosión externa debido al suelo, además deterioran recubrimiento en parte inferior de primer anillo.
- El sistema de protección catódica presenta un funcionamiento normal y los potenciales estructura suelo cumplen el segundo criterio de protección NACE.
- No se identifica mecanismos de daño en la superficie interna del fondo o cuerpo del tanque que puedan afectar su integridad mecánica. En inspección de 2013 no se identificó mecanismos de daño activos en la superficie externa del fondo.
- Se identifica los mecanismos de daño activos de corrosión atmosférica con muy baja agresividad, corrosión interna severa en techo por celdas de concentración de oxígeno y corrosión por H₂S con una menor actividad corrosiva.
- El esquema de recubrimiento original externo del cuerpo requiere reparación completa por la cantidad y extensión de los daños encontrados. Algunos daños son generados por la filtración de agua en sello deteriorado de pestaña de fondo, otros daños corresponden a reparaciones realizadas sin el debido control de calidad y los demás daños son propios del tiempo de servicio prolongado que tiene el tanque.
- El esquema de recubrimiento externo del techo falló por una inadecuada preparación superficial en juntas, aplicación con brocha y rodillo, y problemas asociados con el imprimante epóxico rojo o su aplicación en fábrica que resultó en falla cohesiva.
- El recubrimiento interno original del techo del tanque falló porque posiblemente fue mal seleccionado para el ambiente agresivo o porque fue mal aplicado. La ausencia de un sistema de gas blanketing es un factor determinante para permitir la corrosión. Este recubrimiento se reparó completamente durante el cambio del techo realizado en 2013.
- El recubrimiento aplicado al interior del techo en 2013 presenta un deterioro prematuro en zonas afectadas por el calor de juntas soldadas, debido a una inadecuada preparación superficial en juntas, aplicación con brocha y rodillo, esquema de recubrimiento incompleto respecto al aplicado en el resto de la superficie de las láminas y selección de producto inadecuado para el ambiente agresivo en el interior del techo del tanque.

7 RECOMENDACIONES

- Realizar la próxima inspección de acuerdo con los siguientes intervalos:
 - Inspección visual externa = 5 años (agosto 2022).
 - Medición de espesores = 15 años (octubre 2035).
 - Inspección interna = 5 años (octubre 2025).

- Debido a la morfología del mecanismo de daño identificado en zonas afectadas por el calor del techo, es necesario realizar una caracterización completa de corrosión a corto plazo que se puede realizar con inspección directa intrusiva luego de sacar el tanque de servicio y realizar limpieza completa. En caso de no ser posible sacar de servicio el tanque, se recomienda implementar la técnica de ultrasonido Phased Array presentación scan C, propuesta en esta monografía.
- Realizar aseguramiento técnico a la ejecución de alcances por parte de Proyectos, para la reparación de recubrimiento externo en techo y cuerpo, con el esquema de recubrimiento que se describe a continuación:
 - Reparación de recubrimiento del techo completo en un área aproximada de 129,3 m2.
 - Reparación de recubrimiento del cuerpo completo en un área aproximada de 282,93 m2.
 - Preparación de superficie: Limpieza con chorro abrasivo mínimo a grado metal casi blanco según la norma SSPC-SP10 con un perfil de anclaje de 1,5-3,5 mils.
 - Imprimante: Sika Permacor Serie 82HS o Sika serie 100 Gris, aplicado a un espesor en película seca de 8,5-10 mils, en una capa.
 - Acabado: Sika Esmalte Uretano AR o en su defecto Sika serie 36. Color verde esmeralda RAL 6001, aplicado a un espesor en película seca de 2,5-3,0 mils, en una capa.
 - Reactivación de recubrimiento y aplicación de acabado en escaleras, soportes y barandas, en un área aproximada de 16 m2.
 - Se debe tener en cuenta los tiempos de curado y el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en las fichas técnicas de los productos a utilizar.
 - El solvente para diluir pintura y limpiar zonas de aplicación debe ser el recomendado por el fabricante para ese tipo de esquema. No utilizar thinner comercial ni otro tipo de solvente.
 - En caso de requerirse la utilización de brochas o rodillos para aplicaciones puntuales, se deberá utilizar brochas de cerda animal (no se permite el uso de brochas de nylon) y rodillos de cuero de carnero (no se permite el uso de rodillos convencionales de pelusa).
 - Las partes mezcladas de recubrimiento deben ser homogenizadas completamente previo a su aplicación, utilizando los equipos adecuados como un agitador rotativo o taladro neumático; No se permitirá realizar la homogenización de manera manual.
 - Previo al inicio de los trabajos, verificar la calidad de la arena haciendo una “prueba de vaso de agua”.

- Previo a la preparación de superficie, verificar en campo que el compresor y tolva no presenten fuga de humedad o aceite.

8 BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA.

- API STD 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. 2012.
- API RP 571. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. 2011.
- API RP 575. Inspection of Atmospheric and Low-Pressure Storage Tank. 2014
- API RP 651, Cathodic Protection of Aboveground Storage Tanks. 2014
- API RP 652. Lining of Aboveground Petroleum Storage Tank Bottoms. 2014
- API STD 650. Welded Tanks for Oil Storage. 2012.
- ASTM A36-14. Standard Specification for Carbon Structural Steel. 2014
- ASTM A283 -13. Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates. 2013
- NACE CIP 1 - Programa de Certificación de Inspectores de Recubrimientos. Manual del estudiante 2007.
- NACE RP0193. External Cathodic Protection of On-Grade Carbon Steel Storage Tank Bottoms. 2001
- NACE RP0775. Preparation and Installation of Corrosion Coupons and Interpretation of Test Data in Oil Field Operations. 2005
- ASME Section V, Boiler and pressure Vessel Code, Nondestructive examination. 2019
- ASTM E797 Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic PulseEcho Contact Method.2015