

ANÁLISIS DE FALLO POR CORROSIÓN INDUCIDA MICROBIOLÓGICAMENTE DE UN SISTEMA DE TUBERÍA SOLDADA DE ACERO INOXIDABLE EN UNA ZONA PORTUARIA

B. Arroyo^{1*}, R. Lacalle^{1,2}, J.A. Álvarez¹, S. Cicero¹, X. Moreno-Ventas³

¹ LADICIM, Universidad de Cantabria

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander. España

*Persona de contacto: arroyob@unican.es

² INESCO INGENIEROS S.L.

Centro Desarrollo Tecnológico de la Univ. Cantabria (CDTUC), Fase B, Av/Los Castros 44, 39005 Santander. España

³ GIA, Universidad de Cantabria

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander. España

RESUMEN

En este trabajo se esclarecen las causas de los procesos de corrosión generalizados observados en unas tuberías de acero inoxidable austenítico, grado 316L, para conducción de agua corriente sanitaria instaladas en una zona portuaria. Durante la prueba de carga de la instalación, antes de su puesta en servicio, unos cuatro meses después de su construcción se detectó una pérdida de presión por fuga del fluido contenido en su interior y la presencia de daños por corrosión en la pared de los tubos, en algunos casos incluso de naturaleza pasante. Se llevan a cabo análisis de composición química del material de los tubos, así como análisis de composición química semi-cuantitativa de los depósitos en los defectos y un cultivo de bacterias sulfato reductoras (BSR) en medio Kliguer de las aguas estancadas dentro de la instalación. Todo ello permite concluir que el proceso observado encaja dentro de la llamada corrosión inducida microbiológicamente (MIC) y, con una probabilidad elevada, puede afirmarse que este proceso es promovido por la presencia y proliferación de bacterias sulfato reductoras.

PALABRAS CLAVE: Acero inoxidable 316L, corrosión, picaduras, corrosión inducida microbiológicamente.

ABSTRACT

This paper clarifies the causes of the corrosion processes observed in austenitic stainless steel pipes, grade 316L, for conducting water in a port area. During the pressure test of the installation, before it was put into service, about four months after its construction, a loss of pressure was detected due to a leak of the fluid contained and the presence of corrosion damage on the wall of the tubes, in some cases even passing through the thickness of the tube. Analysis of the chemical composition of the pipe material is carried out, as well as semi-quantitative analysis of the chemical composition of the deposits in the defects, and a culture of reducing sulfate bacteria (RSB) in Kliguer medium of the stagnant waters within the facility. All this allows us to conclude that the observed process fits within the so-called microbiologically induced corrosion (MIC) and, with a high probability, it can be affirmed that this process is promoted by the presence and proliferation of reducing sulfate bacteria.

KEYWORDS: 316L stainless steel, corrosion, pitting, microbiologically induced corrosion.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, al construir o reacondicionar nuevas instalaciones o infraestructuras expuestas a ambientes agresivos, los diseñadores tienden a recomendar el uso de aceros inoxidables para tales fines. Es cierto que estos, principalmente (AISI) 304, 304L, 316 y 316L, son conocidos por su excelente resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas, por lo que han sido ampliamente utilizados en un gran número de entornos y aplicaciones agresivos [1], la mayoría de las veces con buenos resultados y rendimiento. Pero también es cierto que no están libres de problemas de corrosión, como se cree sin fundamento en la práctica. De esta forma, en muchos casos, no se considera necesario tomar precauciones ni realizar un plan de mantenimiento de la instalación para luchar contra los problemas de corrosión

durante las fases de construcción y/o explotación; este hecho ha provocado importantes pérdidas económicas por averías en servicio, o incluso durante la construcción, en un número no despreciable de casos.

Los aceros inoxidables se utilizan con mucha frecuencia para aplicaciones en entornos marinos, que es uno de los entornos naturales más corrosivos del mundo. Además, debido a la influencia de factores corrosivos como la temperatura, el oxígeno disuelto, el Cl⁻ y el pH, los metales (incluido el acero inoxidable) que operan en el medio marino suelen sufrir procesos de corrosión por picaduras, corrosión por grietas o corrosión por tensión, entre otros. Esto restringe la fiabilidad del rendimiento de SS en aplicaciones reales [2,3]. Además, los microorganismos que viven en ambientes marinos tienen un fuerte impacto en el comportamiento frente a la corrosión de los

materiales metálicos [4]. Las bacterias que se adhieren y se multiplican en las superficies de los materiales pueden cambiar significativamente las propiedades de interfaz del material por medios físicos y/o químicos, lo que se conoce como corrosión influenciada microbiológicamente (MIC) [5].

Por otro lado, la MIC puede tener lugar en ambientes y condiciones de trabajo donde no se están produciendo otros procesos de corrosión, o puede aparecer en combinación con otros modos de corrosión. Más importante aún, los microorganismos pueden acelerar la cinética de las reacciones de corrosión anódica/catódica, de tal manera que pueden verse como entidades "catalíticas". Se sabe que los microorganismos inducen un ataque localizado, que incluyen picaduras, corrosión galvánica localizada y agrietamiento por corrosión bajo tensión [6].

Los costos económicos asociados con MIC en tuberías enterradas marinas, petróleo y gas y otras plantas químicas son enormes. Los problemas inducidos por MIC en tuberías/equipos enterrados han atraído mucha atención en todo el mundo [6]. Algunas de las principales preocupaciones a la hora de enfrentarse a la MIC son que, por un lado, es un tipo de corrosión muy rápida (hay ejemplos de tuberías corroídas en lapsos de meses a un año) y, por otro lado, una vez ha comenzado es muy difícil detenerlo y garantizar la integridad del sistema de tuberías afectado.

A pesar de ser un problema conocido, los problemas antes mencionados y las fallas prematuras de los sistemas de tuberías aún ocurren en la actualidad. A modo de ejemplo, en este trabajo se realiza el análisis de fallo de un sistema de tuberías de acero inoxidable grado 316L para conducción de agua dulce instalado en el Puerto de Santander, en el norte de España. La geometría de la conducción es: 10S Pipe 8 Inch (DN 200mm), que tiene 211,58 mm y 219,10 mm de diámetro interior y exterior, y (por lo tanto) 3,76 mm de espesor de pared. Los diferentes tubos empleados se unieron mediante soldadura. El fallo del sistema se detectó antes de su puesta en marcha, cuando surgieron dificultades durante la prueba de presión, unos cinco meses después de su instalación. Durante este tiempo se supuso que el sistema estaba completamente vacío, sin ningún tipo de agua en su interior, según las indicaciones de la constructora.

La semana siguiente a la prueba de presión, la empresa encargada de la obra procedió a realizar una videoinspección del interior de las tuberías. Se detectó la presencia de un daño por corrosión generalizado en las paredes de la tubería, comprobándose un proceso de corrosión por picadura que, en mayor o menor grado, se extendió a prácticamente todos los tramos de tubería inspeccionados. Curiosamente, algunos de los defectos incluso tenían una naturaleza a través de la pared, lo que producía fugas y pérdidas de presión durante la prueba de presión.

De todo esto, la empresa encargada de las obras dedujo que el proceso de corrosión observado debió haberse desarrollado entre la instalación y la fecha de la prueba de presión (aproximadamente cinco meses), ya que no se detectó corrosión justo después de la instalación de

tuberías, ni visualmente ni en las radiografías de las soldaduras circunferenciales.

Este trabajo, por tanto, analiza la falla del sistema de tuberías descrito. La Sección 2 proporciona una descripción general de la metodología experimental, y la Sección 3 proporciona una descripción detallada de los resultados obtenidos y la discusión correspondiente. Finalmente, la Sección 4 recoge las principales conclusiones.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el fin de esclarecer las causas del fenómeno de corrosión antes mencionado en la instalación de tubería del puerto de acero inoxidable AISI 316L, se extrajo un tramo de tubería de 0,6 metros de largo, que se muestra en la Figura 1. Esta sección contiene evidencia clara de los procesos comentados, incluyendo una picadura a través de la pared. Asimismo, como se puede observar, para una mejor protección, las tuberías se cubrieron con un revestimiento de caucho de 0,3 mm de espesor pegado a la superficie externa, el cual tuvo que ser retirado para el análisis posterior.

Con el fin de determinar la causa raíz del deterioro evidenciado en los tubos, se realizaron los siguientes análisis:

- Análisis visual de la muestra.
- Análisis visual de la video-inspección realizada con una cámara robótica en el interior de las tuberías.
- Análisis de la composición química del material.
- Análisis de los defectos de picaduras de tuberías mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Cultivo bacteriano del agua estancada en el interior del sistema de tuberías.



Figura 1. Muestra de tubería extraída del sistema de tuberías del puerto; en el centro se observa una picadura a través de la pared (flecha negra).

Para completar dichos análisis, se extrajeron algunas submuestras del mencionado tubo mediante una cortadora metalográfica de precisión refrigerada, asegurando que no se generaran alteraciones en las muestras.

La sección 3 describe los resultados obtenidos y proporciona una discusión sobre los diferentes hallazgos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Inspección visual

En la sección de la tubería recibida en el laboratorio, se destacó la presencia de una picadura a través de la pared, como se muestra en la Figura 2. Esta picadura no sigue un desarrollo radial desde la cara interna del tubo hacia la externa, sino uno intrincado. En el área interior del tubo, en la vecindad de la pared de picaduras, se pueden distinguir

fácilmente otros conjuntos de picaduras a simple vista, como se presenta en la Figura 2b.

Estos defectos, como se muestra en la Figura 3, están presentes con diferentes niveles de extensión a lo largo de toda la pared interna de la muestra. Cabe señalar que el mismo patrón parece observarse en todas estas iniciaciones de picaduras: picaduras rodeadas de material "limpio" (es decir, tono de acero inoxidable no corroído) que se extiende hasta una corona superficial más externa con evidencia de oxidación.

Asimismo, en la superficie interna del tubo se evidencian los signos de productos de corrosión, caracterizados por un tono rojizo. Estos productos de corrosión se depositan en un sector de la tubería, ver Figura 4, lo que puede ser indicativo de un nivel de agua existente en el interior de la tubería durante algún período del proceso desde la instalación hasta la prueba de presión.



Figura 2. Picaduras en la pared de la muestra a) Cara exterior; b) Picaduras a través de la pared y otros inicios de picaduras, cara interna de la muestra.



Figura 3. Múltiples inicios de picaduras en interior tubo.



Figura 4. Área (elipse roja) con depósitos de productos de corrosión; cara interior del tubo.

3.2. Video-inspección del interior de los tubos

Tras la prueba de presión, y debido a los resultados inesperados, se realizó una videograbación del interior de todo el sistema de tuberías mediante una cámara robotizada. La grabación completa fue proporcionada a los autores de este trabajo. En las varias horas de video que se

recogieron, se observa un deterioro generalizado por corrosión, que es del mismo tipo que el observado en la muestra durante el análisis visual.

La Figura 5 muestra ejemplos de los resultados de las inspecciones realizadas. Estos registros permiten comprobar que la corrosión fue un proceso muy prolongado, con un nivel general de daño que puede calificarse de muy avanzado. Si bien se puede observar que el nivel de daño varía de una sección a otra, no parece haber ninguna sección del sistema de tuberías que esté libre de los procesos de corrosión. En muchos de los hoyos observados (p. ej., Figura 5b), llama la atención una marca en forma de "hongo" alrededor del defecto. Estas marcas pueden ser debidas a la generación de gas durante el proceso de corrosión, el cual se acumula en bolsas, burbujas o tubérculos alrededor del defecto y finalmente revienta (quizás durante la prueba de presión), dejando impresa la mencionada marca "en forma de hongo" en la pared del tubo.

Apoyando la observación anterior, tal como se presenta en la Figura 6, en algunas secuencias de los videos de inspección se puede observar la presencia de burbujas de gas adheridas a la superficie interna de la tubería. Aquí, es importante señalar que la figura muestra imágenes de partes del sistema de tuberías donde el nivel del agua en el interior hizo que la cámara se sumergiera. Una observación más detallada de estas burbujas revela la existencia de un pitting por corrosión en el centro de cada una de ellas, como se presenta en la Figura 6b. Por otro lado, para que exista una separación entre gas y agua se debe considerar la existencia de una película o membrana que separe ambos medios.

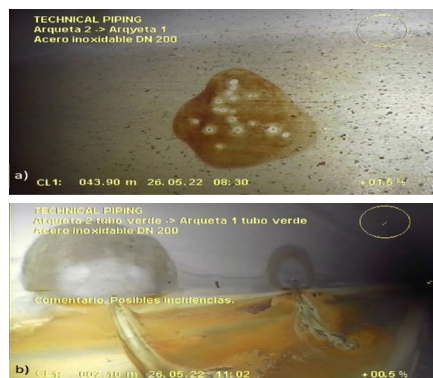


Figura 5. Imagen de video-inspección del interior del sistema de tuberías. a) detalle de picaduras; b) detalle de marcas "en forma de hongo" alrededor de dos picaduras.

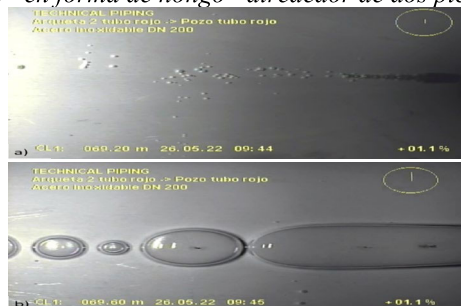


Figura 6. Imagen de video-inspección del interior del sistema de tuberías. a) burbujas de gas; b) detalle de burbujas de gas, justo encima de algunos defectos de picaduras.

3.3. Composición química

Se extrajo una submuestra de la sección del tubo proporcionada, con el fin de determinar la composición química del material. Se determinó mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica de chispa. Los resultados de este análisis se resumen en la Tabla 1, donde, como referencia, también se han incorporado los valores esperados para un acero inoxidable 316L [7].

Como se puede observar, si se consideran las incertidumbres de la técnica de ensayo, todos los elementos presentan porcentajes que pueden considerarse dentro de los rangos requeridos, aunque cabe señalar que Cr, Ni y Mo se encuentran próximos a su correspondiente límite inferior. del rango requerido. También se observa una presencia de Cu en torno al 0,3%, que no se encuentra entre los expresamente tipificados para un acero 316L, pero su presencia no puede clasificar automáticamente la aleación como no conforme a la especificación. En cualquier caso, ni el hecho de que Cr, Ni y Mo se encuentren en el rango bajo, ni la presencia de Cu en las cantidades reportadas, pueden justificar el proceso de corrosión aquí observado.

Tabla 1. Composición química de la muestra; % en peso.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Cu
Tubo	0.022	0.450	1.507	0.035		16.22	9.86	0.037	1.944	0.319
	±	±	±	±	<0.008	±	±	±	±	±
	0.005	0.072	0.080	0.005		0.48	0.37	0.009	0.091	0.028
Norma [7]	<0.03	<1.00	<2.00	<0.045	<0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	--	2.0-3.0	--

3.4. Análisis SEM de las picaduras

Del tramo de tubería recibido en laboratorio se obtuvieron dos submuestras para realizar un análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de los micromecanismos que intervienen en el proceso de pitting aquí analizado. Una submuestra contenía las picaduras de la pared del canal principal (Figura 2a) y su área circundante, y otra muestra contenía un área donde se podían observar picaduras generalizadas en una etapa anterior del proceso (Figura 3). La figura 7a muestra una imagen obtenida mediante SEM del pitting a través de la pared de la muestra (cara interior). En esta imagen se pueden distinguir claramente las zonas en las que el proceso ha avanzado en profundidad, conectando con la superficie exterior. Adicionalmente, también se puede observar una segunda región adyacente a las perforaciones (ver Figura 7b), donde la pérdida de material era evidente a simple vista. En esta región el tubo ha perdido parte del material superficial y se notan los límites de grano, lo que demuestra que se trata de un proceso que avanza preferentemente a lo largo de dichos límites de grano. Finalmente, la Figura 7c muestra un área unida a la picadura a través de la pared donde no se observó pérdida de metal a simple vista, pero donde se puede ver un nivel avanzado de daño en los límites de grano a través de la imagen SEM, lo que respalda la observación anterior sobre el Ataque preferencial en los límites de grano.

Por otro lado, la Figura 8a presenta otra picadura de la segunda submuestra, que se encuentra en una etapa anterior del proceso. Se puede observar que no se trata de una picadura a través de la pared. En este caso, la observación a mayor aumento, mostrada en la Figura 8b, permite

confirmar una vez más la existencia del mismo tipo de procesos que avanza preferentemente a través de los límites de grano.

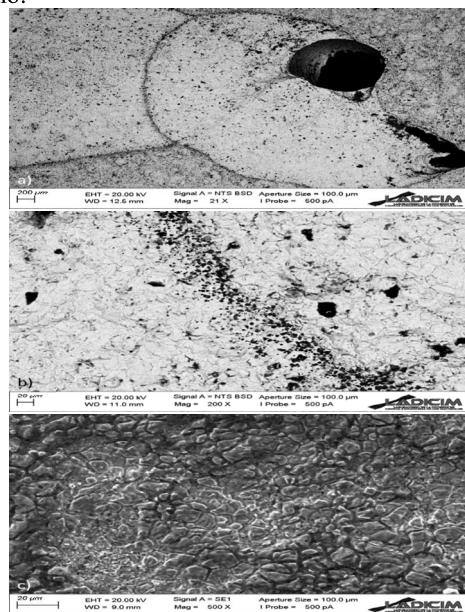


Figura 7. a) imagen SEM de picadura a través de pared en la cara interna de la muestra del tubo; b) área circundante con pérdida de metal a simple vista; c) área circundante sin pérdida de metal a simple vista.

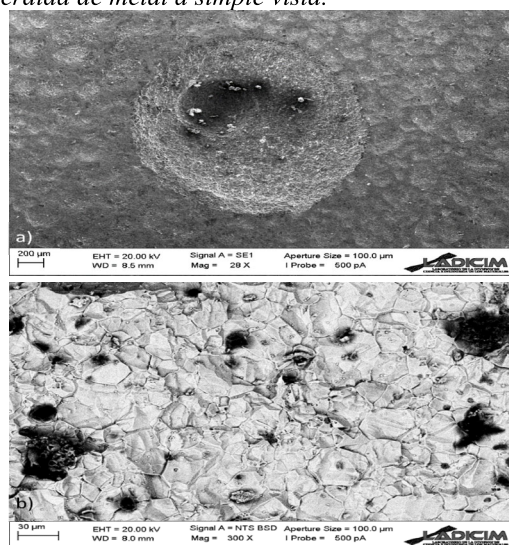


Figura 8. a) Imagen SEM de una picadura en una etapa temprana del proceso en la cara interna de la muestra; b) detalle de picaduras en una etapa temprana.

Como primera hipótesis para explicar los procesos de corrosión que avanzan a lo largo de los límites de grano, vale la pena considerar la existencia de precipitados de carburos de cromo en el límite de grano. Sin embargo, el bajo contenido de carbono del acero inoxidable de grado 316L hace que la formación de estos precipitados sea muy difícil en la práctica (el análisis de composición química reveló un contenido de C del 0,022 %).

En cualquier caso, para descartar esto, se realizó un barrido de composición química semicuantitativo mediante SEM, mostrándose un ejemplo de los resultados encontrados en la Figura 9 (barrido de composición química en una zona no dañada) y la Figura 10 (barrido químico composición en

un límite de grano particular dentro de un área dañada). En todos los casos no se observaron picos de Cr. Si estos análisis hubieran detectado porcentajes de Cr anormalmente bajos, indirectamente habrían sido indicativos de precipitación de carburo de cromo en el límite de grano (la zona cercana a los precipitados se empobrece de Cr para alimentar los carburos). Con todo ello, se puede descartar la sensibilización del acero (precipitación de carburos de cromo en el límite de grano) como causa principal de los fenómenos de corrosión que se analizan.

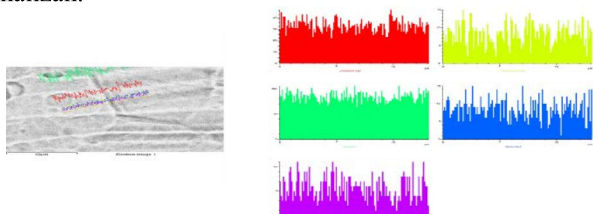


Figura 9. Escaneo de composición química semicuantitativa de límite de grano mediante SEM; Cr en rojo. Área no dañada.

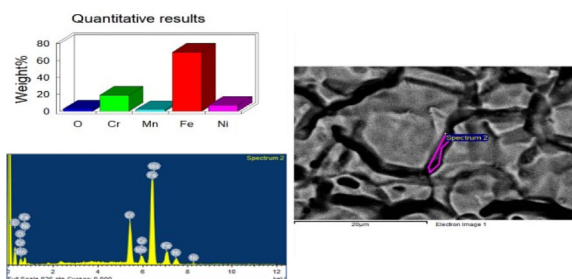


Figura 10. Análisis puntual de la composición química semicuantitativa por medio de SEM ia límite de grano dañado; El contenido de Cr es de alrededor del 16%.

Finalmente, se realizó un análisis SEM semicuantitativo de la composición química de los productos de corrosión depositados en la muestra en el área presentada en la Figura 3, donde se puede observar la aparición de picaduras y depósitos de corrosión. El resultado, que se presenta en la Figura 11, muestra la presencia de azufre (S) en porcentajes no despreciables, que no pueden provenir de la pequeña cantidad de azufre existente en el acero (ver Tabla 1 con un contenido de S <0,008 %). Así, necesariamente, el azufre ha sido aportado externamente, muy probablemente por el agente corrosivo.

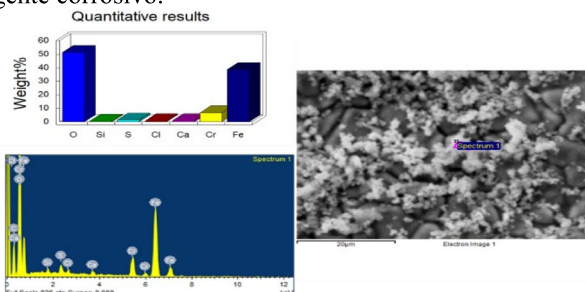


Figura 11. Análisis químico (SEM) de productos de corrosión en el tubo.

3.5. Cultivo bacteriano de agua en el interior de los tubos

Una vez estudiado el sistema de tuberías, se analizó el agua estancada que se encontraba en su interior para profundizar

en las causas de la corrosión. Se obtuvo una muestra de agua estancada en una zona con abundancia de productos de corrosión, y cercana a regiones con clara evidencia de los procesos de corrosión descritos anteriormente.

La muestra se analizó cultivando la mezcla de microorganismos presentes en medio Kliguer e inoculando en pico de flauta a 25°C durante 1 semana. Los resultados durante el tiempo de observación no mostraron la presencia de fermentadores, pero el cultivo arrojó un resultado positivo en cuanto a la presencia de bacterias sulfato-reductoras (SRB). Este positivo en SRB en el cultivo se observa como consecuencia de la reducción del tiosulfato de sodio a sulfuro de hidrógeno, y su precipitación como S_3Fe_2 , lo que genera bolsas de H_2S que probablemente correspondan a las bolsas de gas que se muestran en la Figura 6. Este hidrógeno el sulfuro puede entonces ser utilizado por bacterias quimiolitotrofas de azufre, que no pueden ser detectadas con el medio de cultivo utilizado en este caso, y que lo oxidan generando acidificación del medio.

A pesar de que la secuenciación del ADN es necesaria para la determinación exacta del tipo de bacteria SRB, la observación de las muestras de agua al microscopio óptico permitió detectar organismos que muy probablemente corresponden al tipo de bacteria que proliferó durante el cultivo, como muestra la Figura 12.

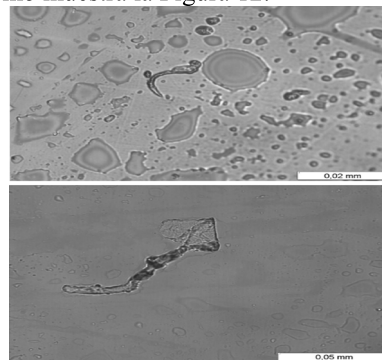


Figura 12. Organismos (probablemente SRB) observados en el cultivo.

3.6. Discusión

Las principales características a destacar en los análisis realizados son:

- el tipo de defectos de corrosión observados,
- la presencia de bolsas de gas detectadas en algunos pozos,
- el desarrollo del proceso en pocos meses,
- la falta de circulación de agua en este período,
- la presencia de azufre en los depósitos de corrosión,
- la presencia de bacterias sulfato-reductoras (SRB), y
- la ausencia de otros signos evidentes de agresividad del medio ambiente o defectos en el material.

Así, tanto por la morfología del daño por corrosión observado como por la evidencia de la presencia de bacterias sulfato reductoras (SRB), la corrosión inducida microbiológicamente (MIC) por SRB parece ser la causa fundamental del proceso que sufren las tuberías que se están instalando. analizado.

Las bacterias sulfatoredutoras (SRB) comprenden varios grupos de bacterias que utilizan el sulfato (que en este caso

debe estar presente en el agua) como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro de hidrógeno H₂S, que es un gas con alta capacidad corrosiva. El proceso se desarrolla generalmente en condiciones anaerobias, favorecidas por la formación de una lámina de material biológico propiamente dicho (biopelícula) u otros elementos del sistema (lodos, recubrimientos, aceites). La acumulación de H₂S da lugar a la formación de bolsas [8], que justifican la existencia de burbujas y también tubérculos como los observados en la Figura 6.

Hay muchas referencias en la literatura que informan fallas causadas por la corrosión MIC en diferentes tipos de aceros inoxidables [9-14] y en particular en el grado 316L [15-19]. Estas referencias comparten tipología, características y rango de tiempo de falla con el proceso de deterioro aquí analizado.

4. CONCLUSIONES

- Defectos similares a picaduras por corrosión han sido la causa de las fallas encontradas en el sistema de tuberías. Asimismo, el desarrollo del proceso de corrosión ha sido muy rápido (5 meses).
- La videoinspección robótica confirmó que la corrosión por picaduras generalizada con picaduras en las paredes está presente en toda la instalación en un grado mayor o menor. Se observan bolsas de gas asociadas a algunas de las fosas, mientras que en otras marcas “en forma de hongo” muestran la presencia previa de bolsas de gas.
- La composición química del material cumple con los requisitos de un acero inoxidable grado 316L, por lo que las deficiencias del material no son la causa de los procesos de corrosión.
- También se evidencia (marcas de nivel de productos de corrosión) la presencia de agua estancada (productos de corrosión caracterizados por una tonalidad rojiza bajo la marca de nivel). El cultivo de los restos de las muestras de agua estancada de la instalación ha resultado positivo en cuanto a la presencia de bacterias sulfato reductoras (SRB).
- Durante el análisis SEM, en las picaduras más desarrolladas no se observó una dirección preferentemente radial, como ocurriría en el caso de picaduras por cloruros, descartándose este tipo de proceso; los pozos siguen un camino intrincado desde la cara interior a la exterior. Además, no reveló evidencia de sensibilización en el acero (contenido de Cr más o menos constante en granos y límites), pero se detectó la presencia de azufre en cantidades no despreciables en los productos de corrosión.

En base a esto, se puede concluir que el proceso observado se encuadra dentro de la denominada corrosión inducida microbiológicamente (MIC), y se puede afirmar que este proceso es promovido por la presencia y proliferación de bacterias sulfato reductoras (SRB). Por otro lado, no se encontraron signos de agresividad en el medio distintos a los típicos de las zonas portuarias. Finalmente, la tipología de los defectos detectados es similar a la de otros casos de CIM reportados en la literatura, así como el resto de características: tipo de picaduras, productos de corrosión, tiempo hasta el fallo, etc., apoyando la conclusión anterior.

REFERENCIAS

- [1] Hu, Y.T.; Dong, P.F.; Jiang, L.; Xiao, K.; Dong, C.F.; Wu, J.S. Corrosion behavior of riveted joints of TC4 Ti-Alloy and 316L Stainless Steel in simulated marine atmosphere. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.* 2020, 40, 167–174.
- [2] Zhang, H.; Li, C.T.; Song, L.J.; Shi, Q.F.; Li, Y. Effects of pH on electrochemical properties of 316L Stainless Steel. *Corros. Prot.* 2013, 34, 593–596.
- [3] Wang, J.; Shang, X.C.; Lu, M.X.; Zhang, L. Pitting nucleation of 316L Stainless Steel in different environments. *J. Mater. Eng.* 2015, 43, 12–18.
- [4] Liu, B.; Duan, J.Z.; Hou, B.R. Study on corrosion behavior of 316L Stainless Steel by microbial film in seawater. *J. Chin. Soc. Corros. Prot.* 2012, 32, 48–53.
- [5] Khandouzi, M.K.; Bahrami, A.; Hosseini-Abari, A.; Khandouzi, M.; Taheri, P. Microbiologically Influenced Corrosion of a pipeline in a petrochemical plant. *Metals* 2019, 9, 459.
- [6] Liu, B.; Sun, M.H.; Lu, F.Y.; Du, C.W.; Li, X.G. Study of biofilm-influenced corrosion on X80 pipeline steel by a nitrate-reducing bacterium, *Bacillus cereus*, in artificial Beijing soil. *Colloids Surf. B: Biointerfaces* 2021, 197, 111356.
- [7] A276/A276M - 17, Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [8] Procópio, L. The era of ‘omics’ technologies in the study of microbiologically influenced corrosion. *Biotechnol Lett.* 2020, 42, 341–356.
- [9] İlhan-Sungur, E.; Cansever, N. Case History 02.15.25.001, Corrosion Atlas, Elsevier, 2019.
- [10] Hussain, M.; Zhang, T. Case History 02.21.25.002, Corrosion Atlas, Elsevier, 2019.
- [11] Van der Kolk, F. Micro-organisms destroyed Stainless Steel installation," Maintworld, Vols. 3-4, no. <https://www.maintworld.com/Applications/Micro-organisms-Destroyed-Stainless-Steel-Installation> (accessed on Jan. 2023).
- [12] Ress, J.; Monrrabal, G.; Díaz, A.; Pérez-Pérez, J.; Bastidas, J.M.; Bastidas, D.M. Microbiologically influenced corrosion of welded AISI 304 stainless steel pipe in well water. *Eng. Fail. Anal.* 2020, 116, 104734.
- [13] ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention. ASM International: Materials Park, OH, UA, 2002.
- [14] Stoecker, J.G. A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion; NACE International, The Corrosion Society: Houston, TX, USA, 2001.
- [15] Otero, E.; Bastidas J.M.; Lopez, V. Analysis of a premature failure of welded AISI316L stainless steel pipes originated by microbial induced corrosion. *Mater. Corros.* 1997, 48, 447-454.
- [16] Wu, C.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Zhang, B.; Ma, G.; Yao, Q.; Gan, Z.; Wu, J.; Li, X. Influence of crevice width on sulfate-reducing bacteria (SRB)-induced corrosion of stainless steel 316L. *Corros. Commun.* 2021, 4, 33-44.
- [17] Liu, H.; Sharma, M.; Wang, J.; Cheng, Y.F.; Liu, H. Microbiologically influenced corrosion of 316L stainless steel in the presence of *Chlorella vulgaris*. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 2018, 129, 209-216.
- [18] Xu, C.; Zhang, Y.; Cheng, G.; Zhu, W. Localized corrosion behavior of 316L stainless steel in the presence of sulfate-reducing and iron-oxidizing bacteria. *Mater. Sci. Eng. A* 2007, 443, 235-241.
- [19] Dao, V.H.; Ryu, H.K.; Yoon, K.B. Leak failure at the TP316L welds of a water pipe caused by microbiologically influenced corrosion. *Eng. Fail. Anal.* 2021, 122, 105244.