

PROCESOS DE EROSIÓN-CORROSIÓN EN UN SISTEMA CONECTADO A VÁLVULA CHECK/STRAIGHT JOINT EN LÍNEAS DE FRACTURAS HIDRÁULICAS

Linares Lizeth/Petromark/lizeth.linares@petromark.com.ar

SIPNOSIS

La fracturación hidráulica es una técnica empleada para aumentar la extracción de gas y petróleo del subsuelo, que consiste en inyectar agua a alta presión, acompañada de arena, aditivos químicos, bactericidas e inhibidores de corrosión, en formaciones rocosas subterráneas. La intensiva operación somete a numerosos equipos y componentes a condiciones extremas, pudiendo ocasionalmente provocar fallos durante el proceso, lo que puede resultar en la fractura de sus materiales. Debido a esto, en este trabajo se analiza las causas de la fractura ocurrida en un sistema de válvula check de 3" y caño (straight joint) de 3" acoplado, pertenecientes a la sección de bombeo de una línea de fractura hidráulica sometidos a erosión; a través de la inspección visual preliminar, de la fractografía (macroscópica y microscópica), análisis químicos, caracterización metalográfica y de barrido y de microdureza sobre las muestras de las piezas falladas. Para la preparación de las muestras se realizaron cortes tanto en el cuerpo del conector de la válvula fracturado como en la cresta superior del filete del conector del caño (straight joint) con pérdida o daños en el material. En las primeras observaciones realizadas a la válvula se encontró la clapeta o disco del mecanismo de retención desprendido, lo que llevó a considerar su evaluación. Los análisis revelaron daños significativos en la válvula check y caño, evidenciando un mecanismo combinado de erosión y corrosión en las piezas. La clapeta del mecanismo de retención también sufrió fracturas, lo que afectó la dirección del fluido, provocando un flujo turbulento en el sistema. La interacción sinérgica de la erosión corrosión no solo generó pérdida localizada de material, sino que también fue el promotor del desarrollo de un mecanismo de fisuración, asistido por el medio ambiente de fractura hidráulica, expresado en la propagación de grietas y microfisuras y en la deformación plástica previa a la fractura dúctil del material.

1. INTRODUCCIÓN

El fracturamiento hidráulico se define como el proceso mediante el cual se aplica presión hidráulica a la formación rocosa del yacimiento hasta inducir su fractura y permitir la extracción de gas o petróleo. Durante esta operación, el fluido de fractura es transportado desde los tanques de mezcla hacia bombas de alta presión a través de tuberías interconectadas mediante juntas rectas (straight joint) y válvulas check, las cuales aseguran el flujo unidireccional hacia el sistema de bombeo. Posteriormente, el fluido es impulsado a alta presión hacia la cabeza del pozo, donde nuevamente se emplean válvulas check para evitar el retroceso del fluido hacia las bombas.

El fluido de fractura está compuesto principalmente por agua, arena y diversos aditivos químicos, tales como reductores de fricción, biocidas, inhibidores de corrosión y ácidos. La combinación de altos caudales, elevadas presiones y la presencia de partículas sólidas genera condiciones severas de servicio que favorecen procesos de degradación acelerada en componentes críticos del sistema, particularmente en zonas donde existen cambios de dirección de flujo, restricciones geométricas o mecanismos internos móviles.

La erosión puede definirse como el desgaste progresivo y la pérdida de material de una superficie metálica debido a la acción mecánica de un fluido que contiene partículas sólidas abrasivas, gotas o burbujas en movimiento a alta velocidad. La severidad del ataque depende de factores tales como velocidad del fluido, régimen de flujo, propiedades del material, tamaño y dureza de las partículas, ángulo de impacto y composición química del medio.

Cuando el fluido posee carácter corrosivo, el deterioro puede intensificarse por la interacción sinérgica entre la acción mecánica y los procesos electroquímicos, dando lugar al fenómeno conocido como erosión–corrosión. En este mecanismo, la película protectora formada sobre la superficie metálica puede ser continuamente removida por la acción del flujo, exponiendo metal fresco al medio y favoreciendo la repetición del ciclo de disolución y desgaste. Si la película formada es frágil o poco adherente, la tasa de degradación aumenta significativamente.

La erosión corrosión se caracteriza morfológicamente por la presencia de surcos direccionales, socavaciones, picaduras y valles, cuya geometría depende del régimen hidrodinámico y de la dinámica de impacto de las partículas. En condiciones de flujo turbulento, particularmente en zonas de cambios de sección transversal o alrededor de componentes internos móviles, la intensidad del ataque puede incrementarse debido a mayores niveles de agitación y concentración local de esfuerzos.

Adicionalmente, a la pérdida localizada de espesor del material, las irregularidades generadas por erosión corrosión pueden actuar como concentradores de tensiones, favoreciendo la iniciación de grietas cuando el componente se encuentra sometido a cargas cíclicas o fluctuaciones de presión. En estos casos, la interacción entre sollicitaciones mecánicas repetidas y un medio corrosivo activo puede promover mecanismos de fisuración asistida por el ambiente, tales como la fatiga asistida por ambiente corrosivo, en los cuales la degradación superficial previa facilita la nucleación y propagación subcrítica de grietas.

En este contexto, el presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de analizar el proceso de erosión corrosión ocurrido en un sistema compuesto por una válvula check y un straight joint de 3 pulgadas, conectados en una sección de bombeo de una línea sometida a fractura hidráulica, el cual presentó fisuración y fractura durante el servicio. Las Figuras 1 y 2 muestran las piezas dañadas correspondientes al conector del straight joint y a la válvula check, respectivamente, las cuales fueron evaluadas mediante inspección visual, análisis fractográfico macroscópico y microscópico, caracterización metalográfica y ensayos complementarios.



Figura 1. Straight Joint



Figura 2. Válvula Check

2. DESARROLLO

2.1. METODOLOGÍA

2.1.1. Inspección Visual Preliminar y Preparación de Muestra

El análisis de la falla se inició con la inspección visual preliminar, sin ningún tipo de aumento o magnificación de las piezas falladas tanto en la válvula como en el straight joint, mostrada en la Figura 3 y 4, con el fin de determinar las zonas a evaluar.

Las piezas fueron cortadas, sin ningún tipo de calentamiento y cambio en la microestructura del material, de tal forma que fuera de fácil manipulación y colocación en los diferentes portamuestras de los microscopios y equipos de análisis utilizados para la observación macro y micrográfica de las áreas dañadas y de la aplicación de ensayos de dureza. Las piezas falladas se identificaron como se muestran en las Figuras 5 y 6.



Figura 3. Válvula Check a) Lado externo b) Daños en cuerpo de conector



Figura 4. Conector del Straight Joint

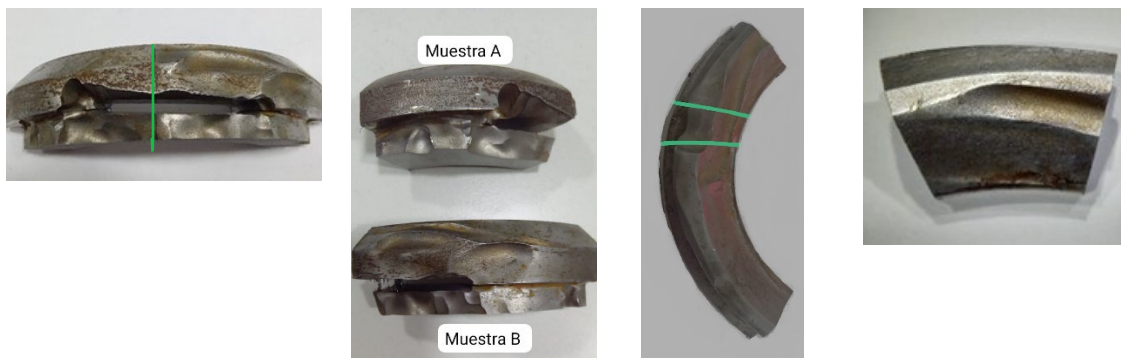


Figura 5. Muestra A y B del conector de la Válvula

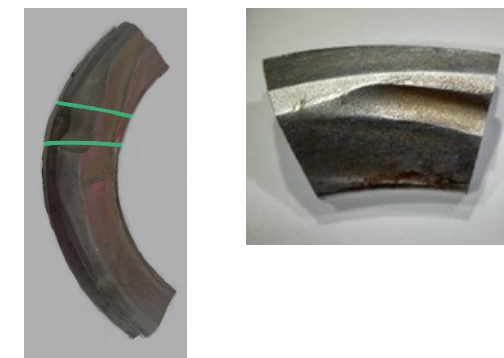


Figura 6. Muestras de conector (Straight Joint)

2.1.2. Fractografía: Macrografía y Micrografía

La morfología de daños presentes en las muestras tanto de la válvula como del conector fue determinada a través de la observación macroscópica, mediante el uso de un microscopio estereoscópico, marca Olympus SZX7 de magnificación hasta 112X con un digitalizador de imágenes Olympus Stream (Ver Figura 7) y de la observación microscópica utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), marca Zeiss Modelo EVO 15 acoplado a un Espectrómetro de Rayos X por dispersión de energía, marca Oxford, modelo X-Max N.

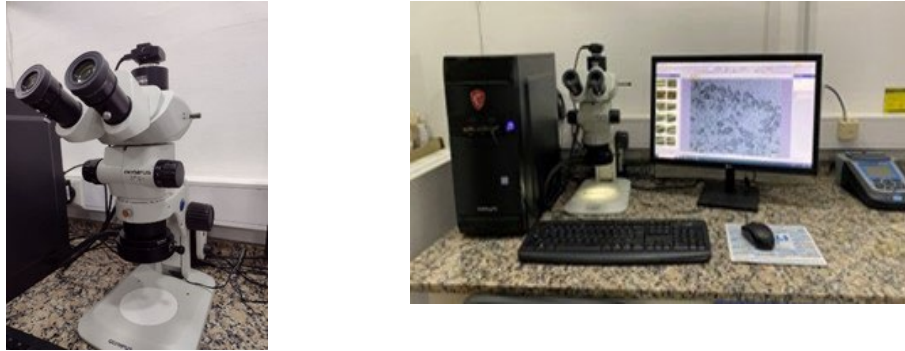


Figura 7. Microscopio estereoscópico marca Olympus SZX7 con un digitalizador de imágenes

2.1.3. Caracterización Metalográfica

La caracterización microestructural se realizó bajo la aplicación de la norma ASTM E3 - 11 “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”. Para el análisis se prepararon tres probetas metalográficas obtenidas según las líneas de corte que se indican en las imágenes de la Figuras 8 (a), (b) y (c). La probeta obtenida del conector se designó como muestra MC, mientras que las obtenidas de la válvula se designaron como muestra MVL, tomada longitudinalmente, y MVF tomada perpendicular al plano de la fisura. Posteriormente, dichas probetas se incluyeron en resina acrílica y se pulieron con lijas de distinta granulometría desde 80 a 1500. En la etapa final del pulido se utilizó una solución de diamante policristalino en suspensión de 1 μm y las muestras fueron atacadas con reactivo Nital al 4% para luego ser observadas con microscopio óptico.

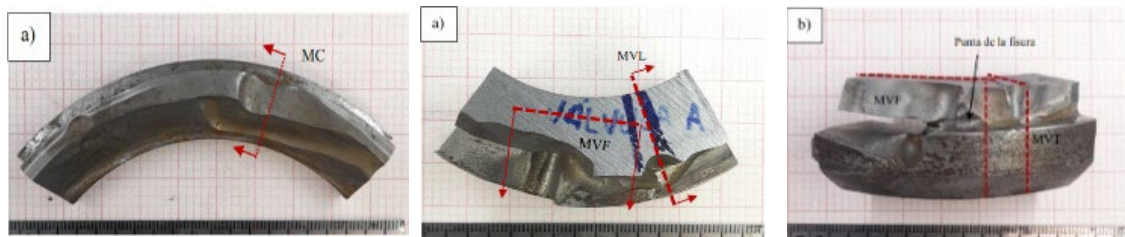


Figura 8. Probetas metalográficas a) Muestra MC, b) Muestra MVL y Muestra MVF.

2.1.4. Microdureza

Las mediciones de microdureza fueron realizadas sobre la superficie de las probetas metalográficas MC y MVL. Cada medición consistió en cinco improntas realizadas en forma de cruz, con una separación entre ellas de 1 mm y una carga de 1 kg (HV1). El equipo de Dureza utilizado es micro durómetro digital marca FUTURE TECH modelo FM 700 con una carga de 1000 g.

2.2. RESULTADOS

2.2.1. Inspección Visual Preliminar

Los resultados obtenidos de la inspección visual preliminar realizada a la válvula check se muestran en las Figuras 9 a), b) y c). En esta inspección se pudo observar los daños presentes en la superficie interna del cuerpo de la válvula; como hoyuelos (picaduras) de forma redondea que se encuentran y unen (coalescencia) en algunas áreas. En la zona central de la válvula se encontró en la superficie tonalidades amarillentas, naranja, marrones y grisáceas con presencia de valles, surcos y pérdida de material en la zona donde se ubica el mecanismo de retención (Ver Figura 9 a)).

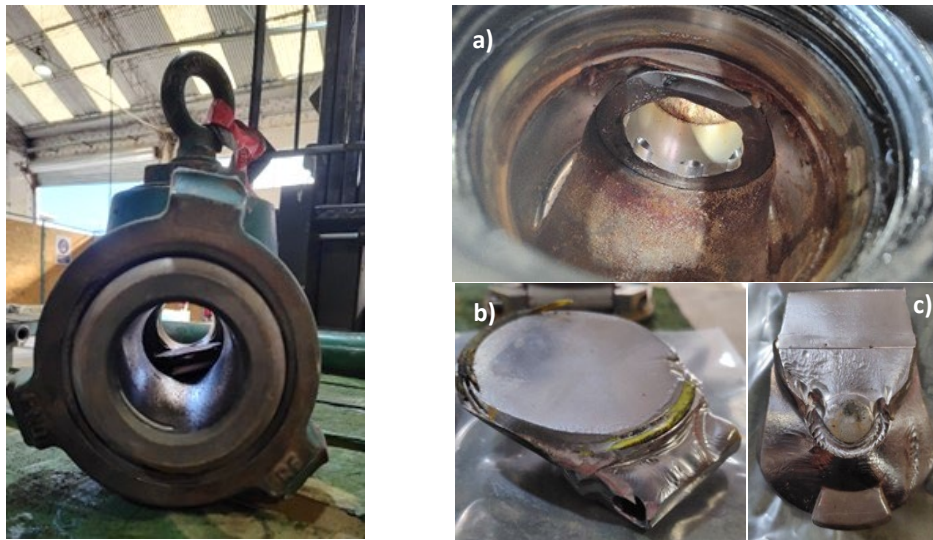


Figura 9. Daños en Disco y Asiento de Válvula

La clapeta o disco del mecanismo de retención se encontró desprendida, con deformación y corte en el cuerpo del péndulo, presencia de surcos, valles y hoyuelos circulares (Ver Figuras 9 b), c) y 10 a)). El perno o elemento sujetador no fue encontrado. En los ejes del asiento se observaron marcas de hoyuelos, fractura y deformación plástica tal como se muestra en las Figuras 11 a) y b).



Figura 10. a) Asiento y Disco (Clapeta) de válvula y b) Daño en péndulo del Disco

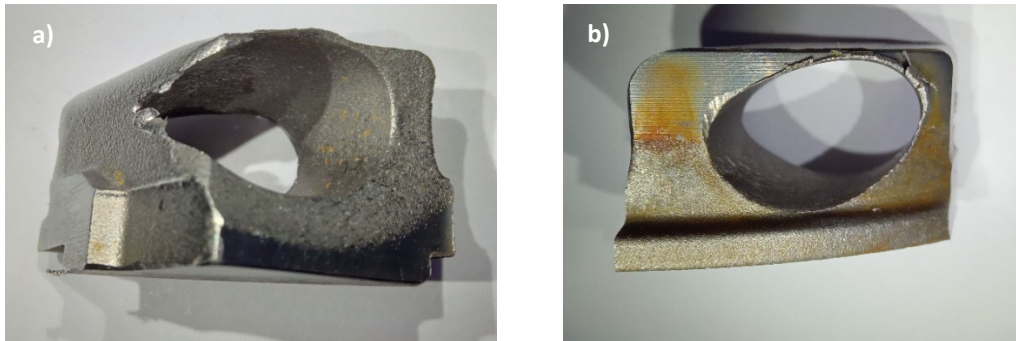


Figura 11. Eje del asiento a) Lado Izquierdo b) Lado Derecho

Los resultados de la inspección visual realizada a válvula check, se muestran en las Figuras 12 y 13 a), b) y c). En la pieza se observó oxidación, pérdida de material y fisuras pasantes en el lado conector al straight joint, así como también formas de valles, olas y surcos muy pronunciados tanto en el filete del conector como en segmentos y tuerca mariposa de la válvula



Figura 12. Daños en Conector de Válvula



Figura 13. Daños a) Cuerpo del Conector, b) Segmentos y c) Tuerca Mariposa de válvula.

En las Figuras 14 y 15, se observa en la superficie del conector straight joint óxidos con coloraciones naranjas y marrones y la misma morfología que en el conector de la válvula como; deformación, surcos y superficies socavadas.



Figura14. Pieza conectora de válvula check lado externo.



Figura 15. Conector parte interna válvula check

2.2.2. Fractografía: Macrografía y Micrografía

Los resultados obtenidos de la observación macroscópica y microscópica realizados sobre las muestras de la válvula check y del conector del straight joint, se muestran desde las Figuras de la 16 a la 32.

En la examinación macrografía y micrográfica realizada al asiento y a la clapeta o disco de la válvula check, se pudo corroborar la fractura ocurrida en el mecanismo de retención. Los ejes de los asientos sufrieron deformación plástica debido a los mecanismos erosivos presentes que ocasionaron surcos, valles y hoyuelos redondeados sobre la superficie de estos componentes (Ver Figura 16 y 18). La deformación plástica y la morfología de clivaje presente muestran una falla de tipo mixta; conocida como cuasiclivaje (Ver Figura 19).

El eje derecho del asiento también sufrió una fractura por fatiga debido a la morfología de marcas de playa encontrada en uno de los puntos de orígenes de la fractura. En esta zona, la clapeta mostró una morfología de corte en el péndulo, indicando que el mecanismo de retención estuvo sometido a esfuerzos cortante y tensiones tangenciales además de los procesos erosivos.

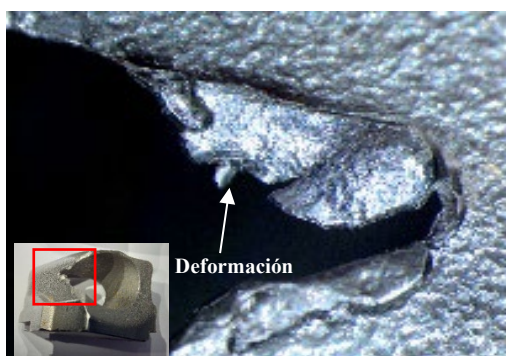


Figura 16. Fisura y deformación en zona del eje del asiento a 16X de Magnificación.

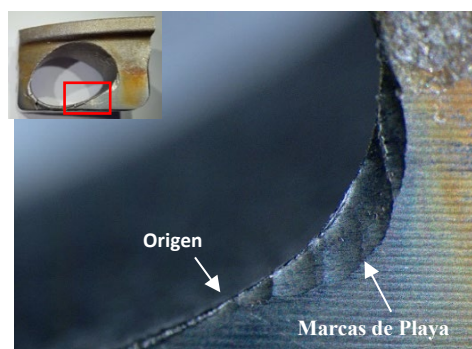


Figura 17. Macrografía de Fisura del asiento a) a 8X de magnificación b) a 16X de magnificación

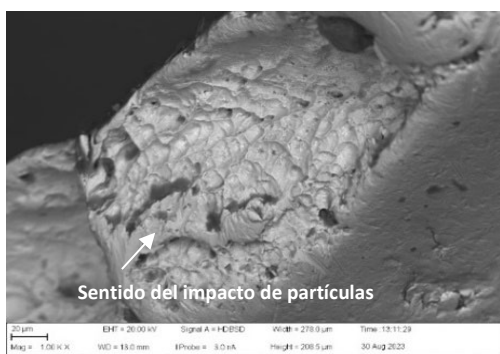


Figura 18. Morfología de surcos, valles y depresiones a 1000X de magnificación.

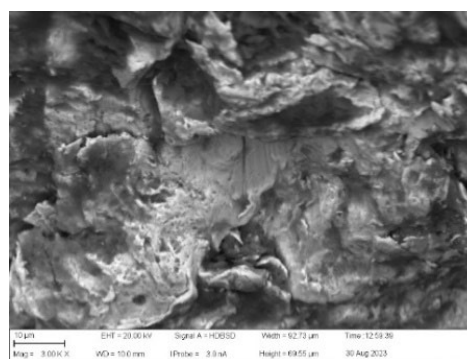


Figura 19. Micrografía de Fisura del asiento a) y b) a 3000X de magnificación

En relación con los daños presentes en el conector de la válvula check, la macrografía y micrografía revelaron la presencia de óxidos, fisuras y grietas transversales al conector, ubicadas en los extremos de la sección socavada de la muestra, así como también varios puntos de orígenes de fracturas, que iniciaron en lugares con procesos de corrosión localizadas (presencia de picaduras) y con morfologías de surcos, socavación y/o de pérdida de material (Ver Figuras 20-21), causando la propagación de grietas y fisuras transversales al conector hasta la fractura dúctil, corroborado por la formación de dimples en la zona de falla y presencia de micro vacíos, tal como se muestra en la Figura 22 y 23 respectivamente.

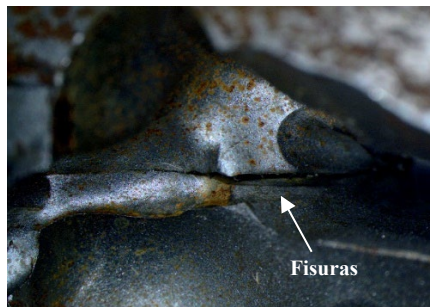


Figura 20. Macrografía en Fisura del conector. Magnificación 8X



Figura 21. Fisuras, grietas y pérdida de material en conector. Magnificación 8X

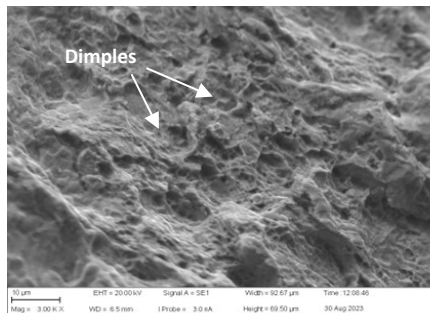


Figura 22. Presencia de Dimples en Superficie de Fractura. Magnificación 3000X

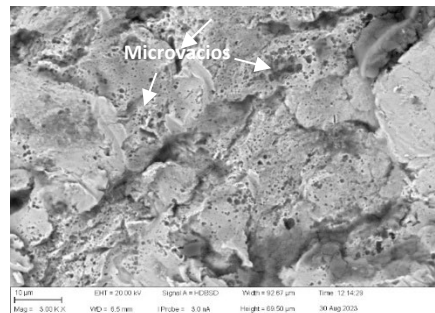


Figura 23. Micrografía en valle de zona erosionada de la muestra. Magnificación 2500X.

Las imágenes que se muestran a continuación, en las Figuras de la 24-27, representan la macrografía de una sección de la muestra B del conector de la válvula check. En la Figura 24, se observan dos (2) puntos de orígenes en la zona de fractura de la muestra, marcas radiales en dirección a estos puntos, presencia de grietas, superficie rugosa y zonas de desgarre o fractura súbita. La Figura 25, destaca tanto la zona erosionada como la zona fracturada, en la sección de la muestra B del conector de la válvula.

En la micrografía presentada en las Figuras 26-27, se observa la presencia de grietas, microvacíos rellenos con óxidos y microcortes en la zona de desgarre.



Figura 24. Macrografía en Fisura del conector. Magnificación 10X



Figura 25. Zona fracturada y erosionada en muestra. Magnificación 8X.

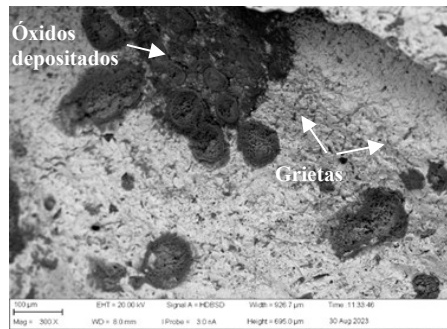


Figura 26. Zona fracturada en muestra B del conector de la válvula. Magnificación 300X.

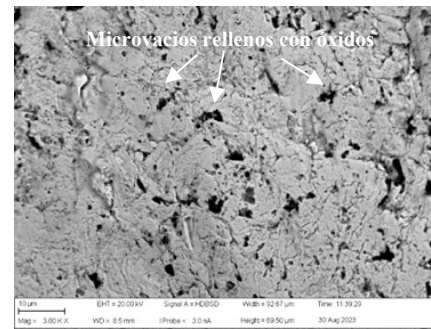


Figura 27. Microvacíos rellenos con óxidos. Magnificación 3000X.

En las imágenes de la Figura 28-29, se presenta la macrografía de la zona erosionada de la muestra B del conector de la válvula. En ellas se puede observar la morfología de la superficie en forma de olas, surcos y valles, por los mecanismos de erosión presentes; así como también presencia de picaduras (pitting) y grietas. En la Figura 29, se observa la pérdida localizada de material en forma de hoyos redondeados en toda la superficie de la muestra.

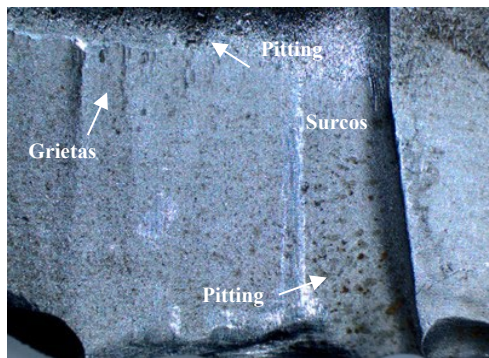


Figura 28. Muestra B del conector de la válvula en zona erosionada. Magnificación a 8X



Figura 29. Hoyos redondeados en el material del conector. Macrografía a 16X

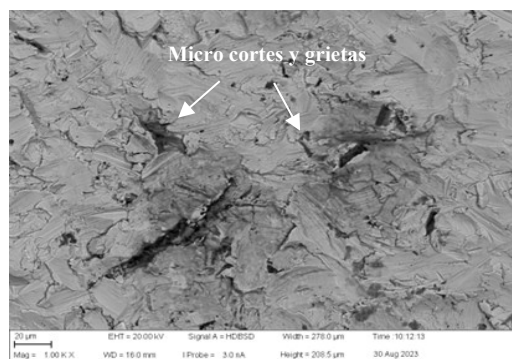


Figura 30. Micrografía en valle de zona erosionada de la muestra B. Magnificación 2500X

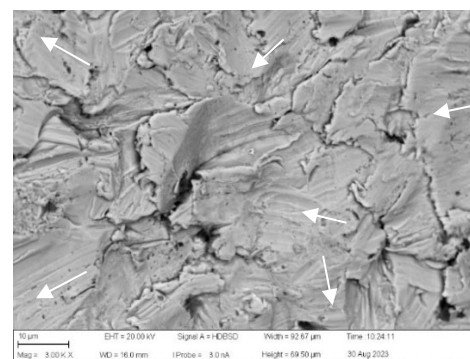


Figura 31. Pérdida de material en conector. Macrografía a 10X

La morfología encontrada en la micrografía de las zonas erosionadas de la muestra de la válvula check, presenta porosidad, microcortes y deformación plástica, así como zonas fisuradas y agrietadas rellenas de óxidos, tal como se muestra en la Figura 30. Las marcas presentes generadas por la erosión mostraron diferentes direcciones (Ver Figura 31), lo que confirma, la formación de un flujo turbulento en la zona del conector que causa el desgaste erosivo del material.

En la macrografía del conector del straight joint, se pudo observar pequeñas fisuras y grietas en el primer filete de la rosca, así como la formación de surcos, presencia de rayaduras y pérdida de material (Ver Figura 32), con menor daño que la presentada en el conector de la válvula.

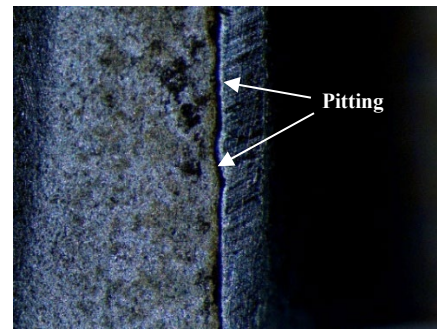


Figura 32. Fisuras y grietas en pieza del conector Straight Joint

Figura 33. Vista a Magnificación 8X y b) Pieza conector Straight Joint (Zona interna). Magnificación 32X

En la Figura 33, se aprecia la misma morfología que la anterior y presencia de picaduras (pitting) sobre el material. Adicionalmente, en la entrada del straight joint se observó presencia de hoyuelos redondeados y surcos con diferente dirección y orientación, evidenciando el paso de un flujo turbulento por el straight, que causa la erosión del material.

2.2.3. Caracterización Metalográfica

Los resultados de la caracterización microestructural se presentan en las Figuras de la 34 a la 41. En las Figuras 34 a), b), c) y d) se presentan las micrografías de la superficie erosionada de la muestra de la válvula check tomada longitudinalmente (MVL). En las Figuras 34 (a) y (b) se observa una superficie lisa sobre una microestructura bandeada, a una magnificación de 50X. En las Figuras 34 (c) y (d) se observan sectores con mayor irregularidad al aumentar la magnificación.

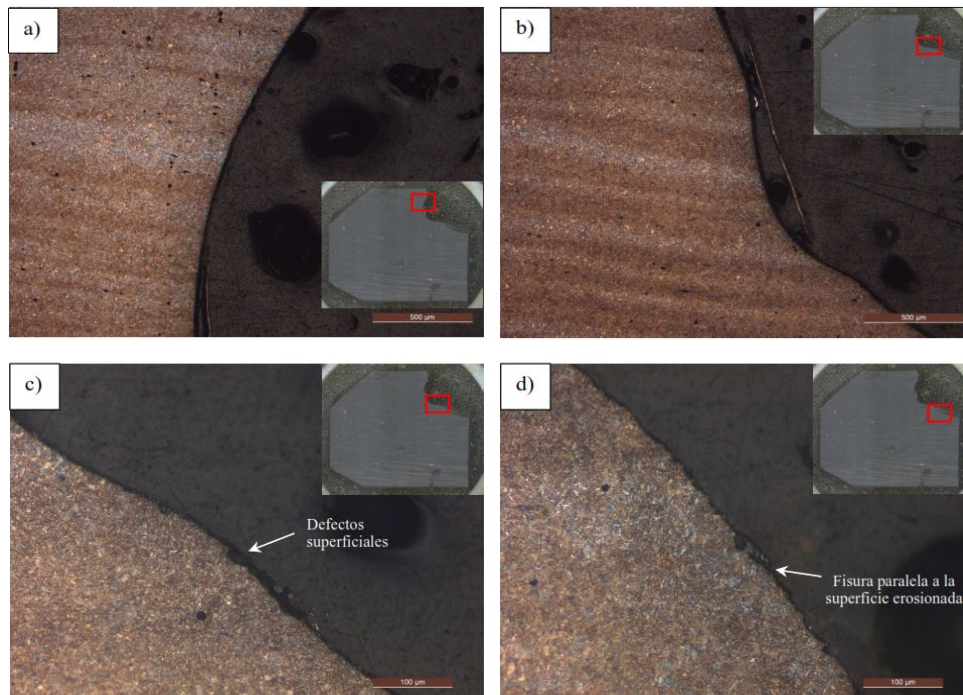


Figura 34. Superficie de erosionada en la muestra de Válvula (MVL). (a) y (b) X50. (c) y (d) X200 de magnificación.

En la Figura 35 se presentan micrografías de la microestructura presente en el núcleo de la válvula, de la muestra MVL de la válvula. En la Figura 35 (a) se observa una microestructura bandeada de martensita revenida. En la Figura 35 (b) se observa la misma microestructura con mayor magnificación.

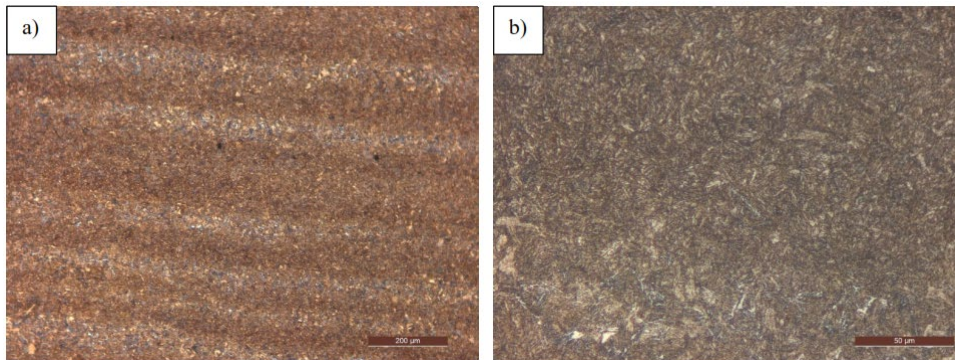


Figura 35. Microestructura presente en la muestra de válvula (MVL). (a) X100, (b) X500.

En la Figura 36 se presentan las micrografías de la superficie erosionada presente en la muestra de la válvula tomada perpendicularmente (MVF). En la Figura 36 (a) se observa la superficie erosionada en el encuentro con la fisura presente en la muestra. Dicha superficie es lisa sobre una microestructura bandeada. En la Figura 36 (b), se observa la misma superficie erosionada, con mayor magnificación, lo que permite apreciar el nivel de rugosidad respecto al tamaño característico de la microestructura.

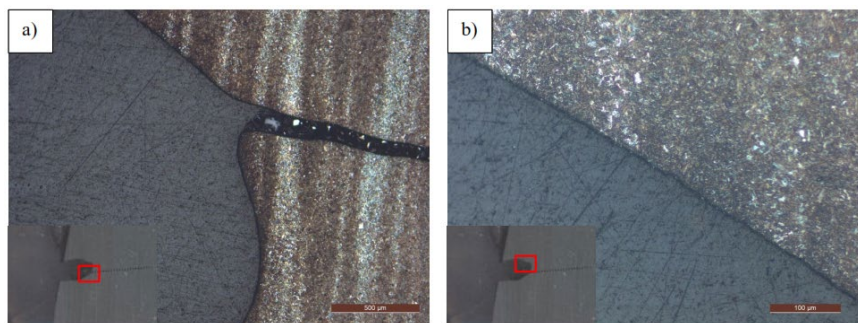


Figura 36. Superficie de la zona erosionada, muestra de válvula (MVF). (a) X50, (b) X200.

En la Figura 37 se presentan las micrografías de la fisura presente en la muestra MVF. En la Figura 37 (a) se observa el nivel de irregularidad de la superficie de la fisura en el encuentro con la superficie erosionada. En la Figura 37 (b) se observa el avance de la fisura en la cual, a su vez, se aprecian pequeñas fisuras secundarias. En las Figuras 37 (c) y (d) se observa el avance de la fisura con mayor magnificación, cerca de la punta de la fisura. En ese sector se observa que ésta se vuelve más errática y se aprecian fisuras secundarias. En la Figura 37 (e) se observan ramificaciones de la punta de la fisura.

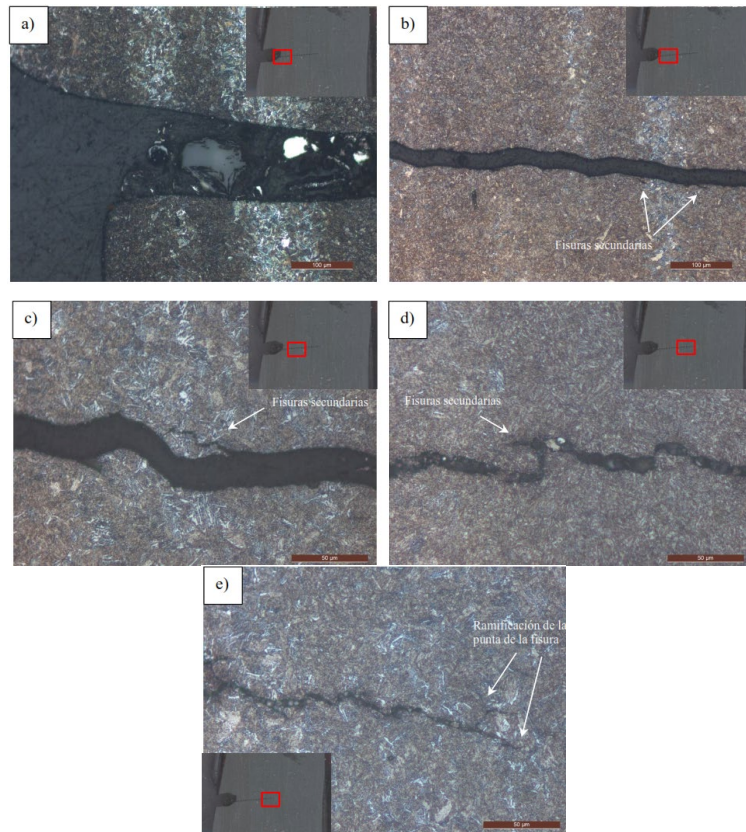


Figura 37. Fisura presente en la muestra de válvula (MVF). (a) Encuentro con la superficie erosionada X200. (b) avance de la fisura X200. (c) y (d) avance de la fisura X500 y (e) punta de la fisura.

En la Figura 38, se presentan las micrografías de la microestructura presente en el núcleo de la válvula, de la muestra MVF. En la Figura 38 (a) se observa una microestructura bandeada de martensita revenida. En la Figura 38 (b) se observa la misma microestructura con mayor magnificación.

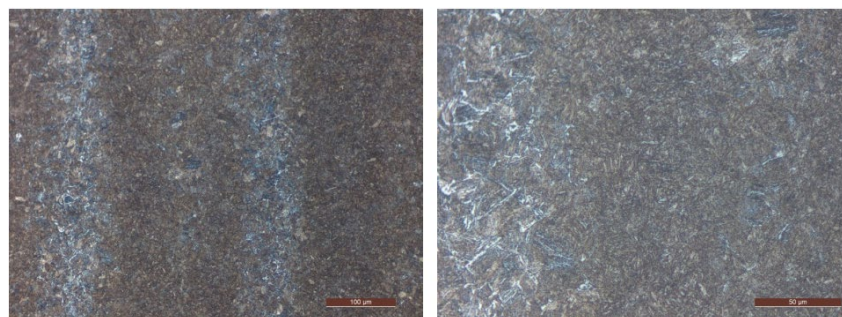


Figura 38. Microestructura presente en la muestra de la válvula (MVF). (a) X200, (b) X500.

En la Figura 39 se presentan las micrografías de la superficie erosionada de la muestra del conector (MC) del Straight Joint. En la Figura 39 (a) se observa una superficie lisa y en las Figuras 39 (b) y (c) referente a otros puntos de la muestra se puede apreciar, a una magnificación de 100X, una superficie rugosa.

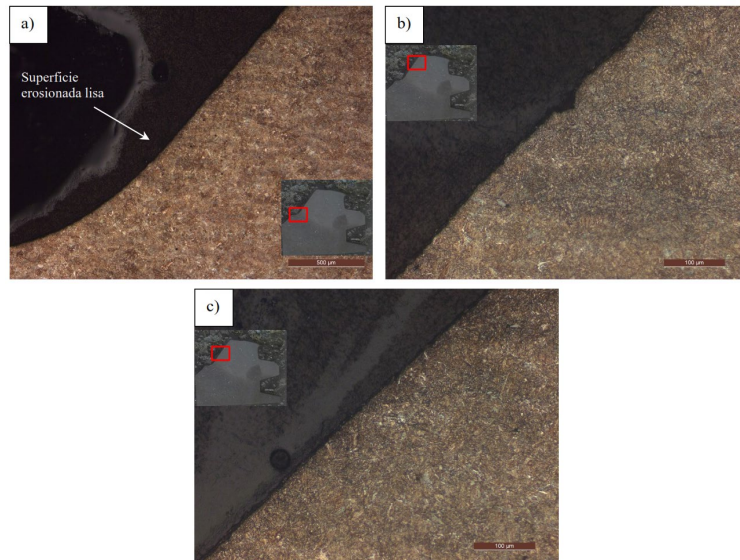


Figura 39. Microestructura presente en muestra del conector Straight Joint (MC).
(a) Encuentro con el interior del conector X50, (b) parte central de la fractura y (c) Encuentro con la rosca del conector. X200 de magnificación.

En la Figura 40 se presentan las micrografías de la superficie dañada en la cresta del filete del conector Straight Joint. En la Figura 40 (a) se observa deformación plástica, la cual genera un cambio microestructural de la superficie del filete. En la Figura 40 (b) con mayor magnificación, se observa la microestructura afectada en la zona deformada plásticamente. La Figura 40 c) se presenta una micrografía representativa del valle de los filetes roscados, lo que permite apreciar que la microestructura es homogénea, desde el núcleo del conector hasta la superficie de los filetes.



Figura 40. Superficie dañada en la cresta del filete. (a) y (b) X200. Superficie del valle del filete roscado en muestra del conector Straight Joint.

En la Figura 41 se presentan las micrografías con ataque químico de la microestructura presente en el conector. En la Figura 41 (a) se observa una microestructura de martensita revenida. En las Figura 41 (b) se observa la misma microestructura a mayor magnificación, en donde se puede apreciar la presencia de inclusiones no metálicas.

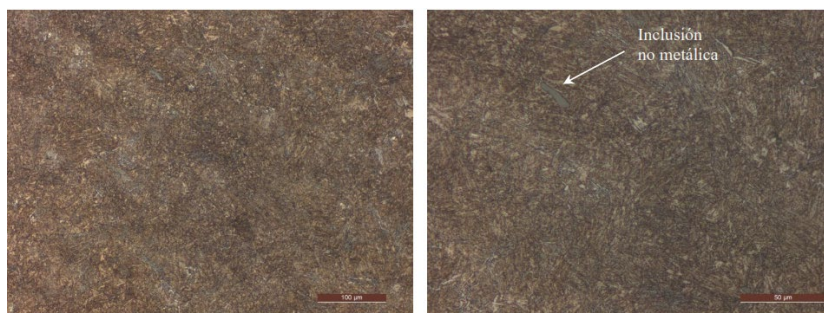


Figura 41. Microestructura presente en la matriz en muestra del conector Straight Joint (a) X200, (b) X500 de magnificación.

2.2.4. Microdurezas

El resultado del barrido de durezas realizado a la probeta de la muestra de la válvula (MVL) y del conector del straight joint (MC) se presenta en la Tabla 1 y 2 respectivamente. En la Tabla 1, se muestran las mediciones en la probeta MVL y se obtuvo un valor promedio de 331 HV1 y 33,5 HRC.

Tabla 1. Valores de microdureza Vickers obtenidas en la probeta MVL.

Medidas	HV1	HRC
0	327	33.3
1	329	33.2
2	331	33.4
3	323	32.5
5	344	34.9
Promedio	331	33.5
Desviación Estándar	7.95	0.879

En la Tabla 2, se muestran las mediciones en la probeta MC y se obtuvo un valor promedio de 291 HV1 y 28,6 HRC, ubicándose dentro de los valores establecidos para un acero AISI-SAE-4140.

Tabla 2. Valores de microdureza Vickers obtenidas en la probeta MC.

Medidas	HV1	HRC
1	286	27,9
2	291	28,6
3	292	28,7
4	289	28,4
5	295	29,2
Promedio	291	28,6
Desviación Estándar	3,36	0,472

2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través de los resultados obtenidos de la evaluación tanto de la Válvula Check como del Straight Joint, y del mecanismo de retención ubicado dentro de la válvula; de la macrografía y micrografía, metalografía y de dureza, se deduce que:

El origen de los daños por erosión corrosión en el sistema conectado a válvula, inició en el mecanismo de retención, donde los ejes del asiento de la clapeta presentaron deformación plástica asociada al impacto de partículas sólidas sobre el metal, que se evidencia por las morfologías de surcos, valles y hoyuelos redondeados correspondiente a los procesos de erosión. Así como fractura mixta, bajo condiciones de alta restricción triaxial, típica de sobrecarga dinámica en aceros templados y revenidos.

En el eje derecho del asiento se identificaron marcas de playa en uno de los puntos de origen, lo que confirma un proceso de propagación por fatiga previo a la fractura final. Esto es coherente con las condiciones de servicio de un sistema de fractura hidráulica sometido a presión.

La clapeta a su vez presentó fractura por esfuerzos cortante y tensiones tangenciales ocurridas en el péndulo que la sostiene trayendo como consecuencia su desprendimiento. Al fallar el mecanismo de retención se perdió la unidireccionalidad del fluido, provocando un flujo turbulento y ondas de presión que golpea las paredes internas de la válvula, causando la erosión del material.

La presencia de marcas erosivas en distintas direcciones en los conectores confirma la existencia de flujo no uniforme posterior a la falla del retenedor. Esta alteración hidráulica constituyó el punto de transición entre un daño localizado en el retenedor y un proceso degradativo más severo en los conectores.

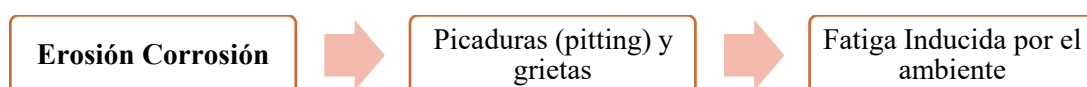
El conector de la válvula check presentó el daño más severo del sistema. La macrografía reveló:

- Superficies onduladas.
- Surcos y socavación.
- Pérdida localizada de material.
- Picaduras (pitting).
- Hoyos redondeados distribuidos en la zona erosionada.

Estas características indican un mecanismo de erosión corrosión bajo flujo turbulento con transporte de partículas. La remoción continua de material favoreció la exposición permanente del sustrato metálico, impidiendo la estabilización de productos protectores y promoviendo el desarrollo de picaduras activas.

Adicionalmente, la micrografía y la metalografía realizada en el conector mostraron la presencia de grietas que se originaron en la superficie erosionada, presencia de fisuras secundarias, desviaciones y pequeñas ramificaciones en la región próxima a la punta de grieta con óxidos en su interior. Estas características son indicativas de que, el crecimiento de la grieta no depende solo del esfuerzo mecánico sino del ambiente o medio corrosivo que modifica la propagación de la grieta. La fractura final mostró dimples y microvacíos, confirmando una sobrecarga dúctil posterior al crecimiento previo de la grieta.

Dado que el sistema opera bajo altas presiones y condiciones dinámicas, el mecanismo clasificado dentro de los procesos de fisuración asistida por ambiente según American Petroleum Institute RP 571 es:



De igual manera, el conector del straight joint presentó el mismo mecanismo en etapa temprana, de erosión en la cresta del filete, con morfología de surcos y rayaduras, picaduras, hoyuelos redondeados el cual generó un cambio microestructural en la zona deformada plásticamente, fisuras y grietas, y pérdida de material.

Limitaciones del estudio

El presente análisis se realizó a partir de la evidencia física disponible en los componentes fallados y de los ensayos efectuados sobre las muestras extraídas. No se dispuso de información detallada respecto de las condiciones operativas específicas del sistema al momento de la falla, tales como presión y caudal reales de servicio, número de ciclos de operación, distribución de tamaños de partículas sólidas en el fluido, ni composición química detallada del medio de fractura hidráulica.

Asimismo, no se contó con la documentación original del fabricante relativa a especificaciones de tratamiento térmico ni rangos de dureza nominales para los componentes evaluados. En consecuencia, la comparación de propiedades mecánicas se realizó respecto de valores típicos reportados en literatura para aceros AISI-SAE 4140 templados y revenidos.

3. CONCLUSIONES

- El análisis integral de inspección visual, fractografía, metalografía y microdureza permitió establecer que la falla del sistema válvula check straight joint no respondió a un único mecanismo, sino a una secuencia progresiva de daño dependiente de la función hidráulica y la geometría de cada componente.
- El mecanismo de retención (asiento y clapeta) falló principalmente por un proceso caracterizado por erosión superficial, concentración de tensiones y propagación por fatiga en uno de los ejes, culminando en una fractura mixta (cuasiclivaje y sobrecarga).
- La pérdida de funcionalidad del mecanismo de retención provocó la alteración del régimen de flujo interno, generando condiciones de turbulencia intensa y distribución no uniforme del impacto de partículas sólidas, lo cual incrementó localmente los esfuerzos dinámicos sobre los conectores.
- El conector de la válvula check presentó el daño más severo del sistema, caracterizado por un proceso de erosión–corrosión localizada que generó socavaciones, surcos y picaduras profundas actuando como concentradores de tensiones; la evidencia macro y micrográfica mostró que las grietas se iniciaron en estas discontinuidades superficiales y propagaron de manera progresiva, con presencia de fisuras secundarias, ramificaciones y óxidos en su interior, hasta culminar en una fractura dúctil final.
- El straight joint presentó daños de menor severidad, consistente en erosión corrosión con iniciación incipiente de microfisuras en el primer filete de la rosca, deformación plástica superficial y presencia de picaduras, sin evidencia de propagación avanzada o fractura final. Esto indica que el componente se encontraba en una etapa temprana del mismo proceso degradativo.
- El análisis comparativo entre los componentes demuestra que la severidad del daño estuvo directamente relacionada con la alteración hidrodinámica posterior a la falla del mecanismo de retención y con la concentración geométrica de tensiones en los conectores.
- Desde el punto de vista de integridad mecánica, el daño identificado en el conector de la válvula check corresponde a un mecanismo crítico que no puede evaluarse únicamente mediante criterios de pérdida de espesor, sino que requiere estrategias de inspección orientadas a detección de fisuras en zonas de concentración de tensiones, en concordancia con los lineamientos de gestión de integridad establecidos por American Petroleum Institute RP 571.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Mars G. Fontana, “Corrosion Engineering”. Third Edition. Mc Graw Hill. 1987.
- Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment In The Refining Industry API Recommended Practice 571 Second Edition, April 2011.
- Jonathan, Bellarby. Well Completion Design. Developments In Petroleum Science, 2009.
- M. V. Prozhega*, N. A. Tatus, S. V. Samsonov, O. Yu. Kolyuzhni, and N. N. Smirnov, “Experimental Study of Erosion–Corrosion Wear of Materials: A Review, June 4, 2013.
- Darío Códega, Nicolás Rebasa y Gabriel Weber, Lisandro Garza y Gonzalo Cabo, “Evaluación y predicción de erosión en tubería de producción, en el proceso de fractura hidráulica” Petrotecnia, Febrero, 2015.
- “Caracterización Microestructural De Válvula Y Conector Erosionados”. Informe Final N° LMT 64-REV.00-2023. Departamento de Mecánica Aplicada FaIn-UNCo, Septiembre 2023.
- Standar Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion, ASTM G46.
- George Quercia Bianchi, “Comportamiento Tribológico De Materiales Cerámicos, Metálicos Y Compuestos”, Sartenejas, Venezuela. Noviembre 1999.

5. RESUMEN CURRICULAR

- **LIZETH MARIA LINARES PEREZ**

Magister Scientiarum en Corrosión, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

Ingeniera Químico, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

Magister en Corrosión e Ingeniero Químico con más de 18 años de experiencia en la planificación, coordinación, ejecución y seguimiento de la evaluación, diagnóstico y control de la corrosión sobre equipos y componentes metálicos de la industria de Oil & Gas y del sector de generación y transmisión de energía eléctrica. Certificada como Inspectora de Recubrimientos AMPP (NACE) CPI 2 y 1, así como Técnico y Tester en Protección Catódica AMPP (NACE) CP2 y CP1.

Cargo actual en la empresa:

PETROMARK, 2019 – presente. Líder Técnico en Protección Catódica/Corrosión