



Las estadísticas demuestran que una falla en un gasoducto en operación es algo poco frecuente; sin embargo, frente a una falla se debe realizar un análisis exhaustivo de la causa raíz que la provocó para que no vuelva a ocurrir.

Durante 2016, Transportadora de Gas del Sur (TGS) sufrió una falla en servicio en una de sus líneas principales. Esta línea se encuentra en operación desde 1974, es de 30" de diámetro, 8,74 mm de espesor API 5L -X52 MAPO 60 kg/cm², revestimiento asfáltico. La falla es produjo a 5 km de la descarga de una planta compresora.

Como resultado del evento se produjo una fractura longitudinal que afectó 70 m de cañería (Figura 1), produciéndose, además ignición lo que provocó que el material remanente se encontrara en un estado muy degradado haciendo complejo el análisis de falla posterior.

Dadas las características mencionadas y teniendo en cuenta el historial de mantenimientos, las inspecciones internas, los potenciales, las condiciones de operación al momento del evento no resulto posible determinar una causa probable de la falla *in situ*. Por eso se debió aplicar un

Defectos de fabricación: una amenaza creciente en la región

Por *Ing. Mariana Corsico* e *Ing. Sergio Río* (Transportadora de Gas del Sur S.A.)



Figura 1. Cañería afectada por la falla. Zona de falla.

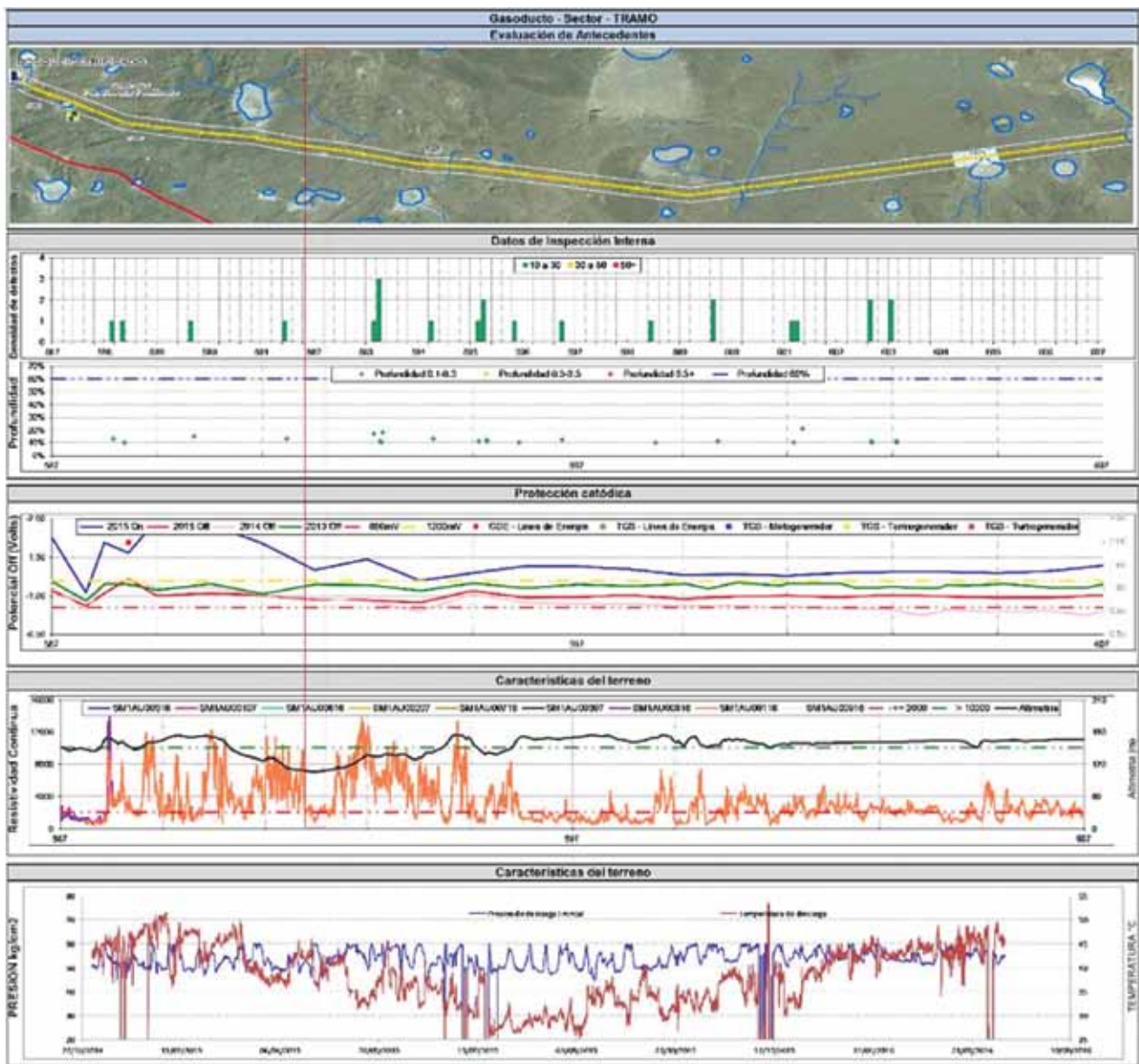


Figura 2. Gráfico de datos alineados. Antecedentes de inspección

protocolo de análisis que contemplase todas las posibles amenazas a la integridad.

Como resultado del análisis se determinó que el gasoducto falló por un defecto de fabricación en la soldadura longitudinal. El objetivo de este trabajo es describir la experiencia de TGS frente a esta falla en un gasoducto de más de 40 años en servicio.

Análisis de antecedentes de la cañería

Una revisión integral de antecedentes con la metodología de datos alineados se llevó a cabo en la zona de falla para identificar las particularidades presente (Figura 2).

Del gráfico alineado de la figura 2 se desprende que el tramo cuenta con 6 inspecciones internas con tecnología MFL y TFI de alta resolución, en los informes de inspección no se informa ningún tipo de defecto en la zona del evento.

Los relevamientos de potenciales anuales históricos indican que la cañería se encuentra protegida.

Dentro de los criterios de aceptación de la NAG 100.

La falla se produjo en una depresión del terreno asociado con valores muy bajos de resistividad.

La presión de operación al momento del evento 59,8 kg/cm², los registros históricos indican que no superó la máxima admitida. (MAPO). La temperatura al momento del evento fue de 45 °C, la máxima es de 50 °C.

Inspección visual in situ

En concordancia con los antecedentes, no se evidenciaron defectos volumétricos en ningún punto de la chapa del material afectado. Tampoco se evidenció actividad de terceros en la zona de falla.

Dado el estado del material por la afectación del fuego (Figura 3), resultó difícil determinar en el campo el punto de inicio de la falla, por lo que se seleccionaron diferentes sitios de interés para realizar análisis de laboratorio.



Figura 3. Estado de las chapas luego de la ignición. Estado del material.

Inspección visual bajo condiciones de laboratorio

En el laboratorio se realizaron ensayos de partículas magnéticas a todas las muestras seleccionadas en campo, no se evidenciaron fisuras asociadas al mecanismo de SCC en la superficie del material, superficie de fractura y/o soldaduras.

Como resultado de la inspección se identificó la existencia de un defecto en la soldadura longitudinal de doble arco sumergido de aproximadamente el 50% del espesor en la cara externa de la cañería (Figura 4).

Además, en condiciones de laboratorio se identificaron las marcas del tipo “Chevron” (Figura 5), con diferente orientación a ambos lados del defecto. Esto en campo no se había logrado dado que la superficie de fractura estuvo expuesta a fuego y a daños mecánicos.

Análisis químico y mecánico del material

Se realizaron los análisis químicos y mecánicos de las muestras extraídas. A continuación se detallan los resultados obtenidos.

- Análisis químicos

Método de espectroscopia de emisión por chispa. Material base y soldadura. (Tabla 1).

El material cumple con los requerimientos de composición para acero API 5L X52.

- Ensayos de Tracción. Material base y soldadura. (Tabla 2).

El material base cumple con los requerimientos mecánicos para acero API 5L X52.

En el ensayo de tracción en material de la soldadura la

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Material base	0,22	0,25	1,24	0,015	0,014	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001
Soldadura	0,16	0,45	1,11	0,019	0,020	0,04	0,03	0,02	0,09	0,004
API 5L X52	0,22	0,45	1,40	0,025	0,015					

Tabla 1. Resultados obtenidos en los análisis químicos del material base y de soldadura.



Figura 4. Defecto detectado en costura longitudinal. Defecto.

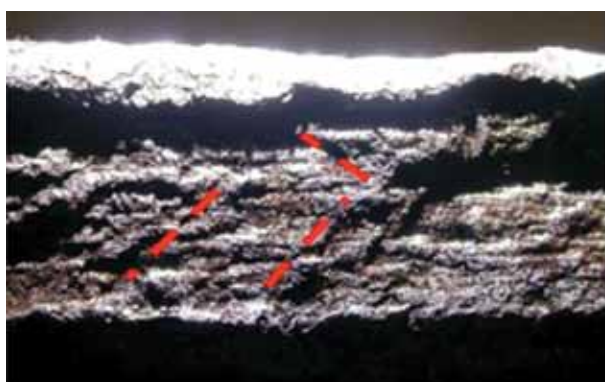
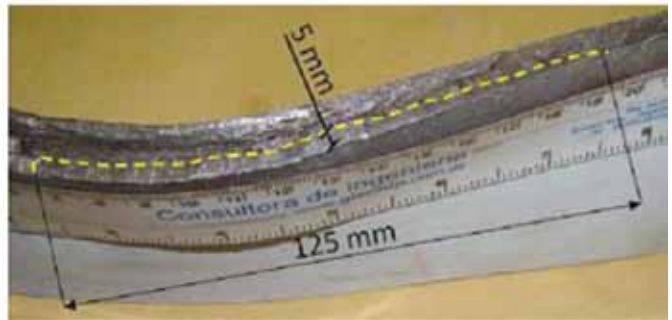


Figura 5. Chevrones identificados en laboratorio. Chevrones.

Muestra	Tensión de fluencia (Mpa)	Tensión de rotura (Mpa)	Alargamiento (%)	Observaciones
Material base	399	549	27,7	-
Soldadura	-	587	-	Fractura dúctil en material base
Referencia API 5L X52	359 - 758	455-758	> 20	-

Tabla 2. Resultados de los ensayos mecánicos del material base y de soldadura.

fractura se produjo de manera dúctil en el material base. Lo que indica que las propiedades mecánicas de las soldaduras son superiores a las del material base.

- Ensayos de dureza. Material base y largo de la soldadura longitudinal.

El promedio de las mediciones sobre el material base da un valor de dureza de 171 HB. Este valor concuerda con lo requeridos para acero API 5L X52.

Además se analizó la dureza en la zona del defecto descartándose la presencia de un *hardspot* (punto duro) en la misma.

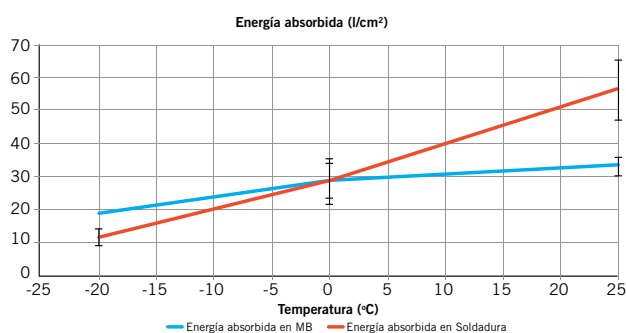


Figura 6. Resultado de los ensayos de impacto.

- Ensayos de impacto del tipo *Charpy*. Material base y soldadura (Figura 6).

Se realizaron los ensayos a tres temperaturas (0 °C, -25 °C, 25 °C).

Tanto el material base como el de soldadura superan el valor mínimo para acero API 5L X52.

Todas las propiedades químicas y mecánicas del material base y de soldadura longitudinal del caño fallado están dentro de los valores admisibles definidos por la norma API 5L de aplicación a la fecha de construcción del gasoducto para el acero X52.

Análisis fractográfico y de microscopio

- Análisis metalográfico en microscopio óptico

En el perfil de falla se evidencian dos zonas bien definidas, una zona plana correspondiente al defecto que ocasionó la falla (iniciador) y otra zona rugosa correspondiente a la propagación rápida (Figura 7a).

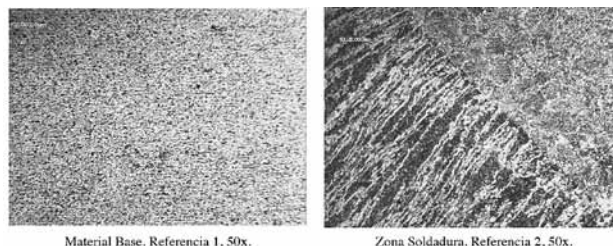


Figura 7a. Caracterización de falla.

Se realizaron distintas probetas con el objetivo de realizar una caracterización metalográfica y microestructural del material y del defecto (Figura 7b).

Se evidenciaron granos deformados y de diferentes tamaños en la superficie de fractura (Figura 8). El origen puede estar asociado a un fenómeno de falta de fusión.

- Evaluaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se inspeccionó la superficie de fractura en microscopio de barrido electrónico y se analizó la composición química mediante EDAX.

Se observa una diferencia de coloración que podría indicar la diferencia en tiempo de existencia de las dos zonas en el defecto (Figura 9).

Superficie de fractura, zona de propagación. Referencia D (Figura 10). Se observan estrías del orden del micrón, señaladas por flechas. SEM, 10000X. Las estrías podrían estar relacionadas con un proceso de fatiga. Esta

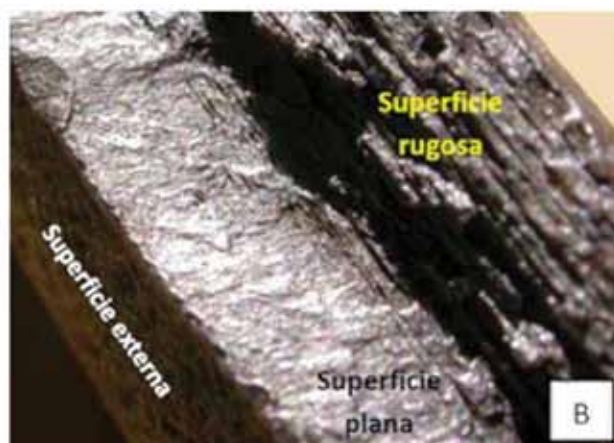


Figura 7a. Perfil de falla.

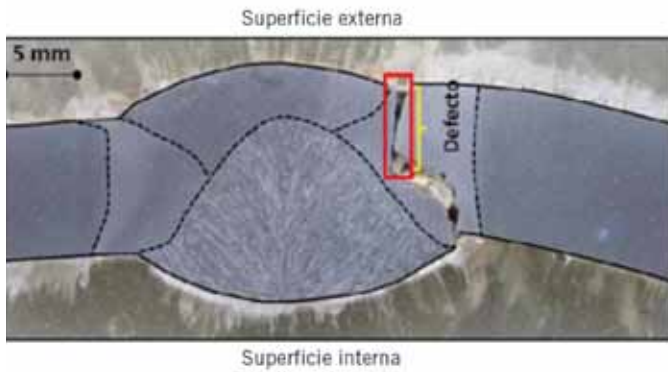


Figura 8. Caracterización de superficie de fractura. Zona de defecto

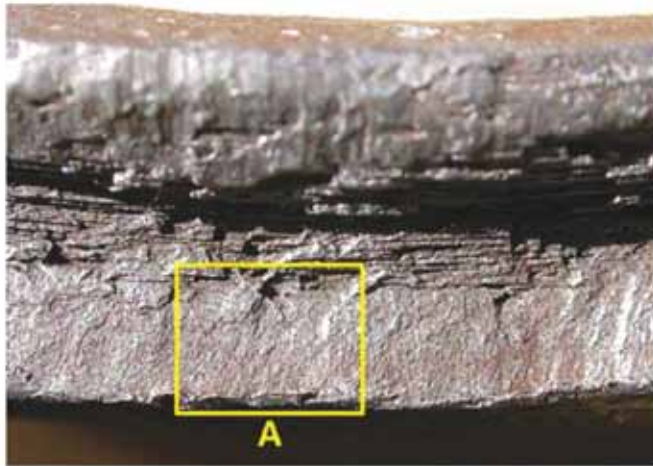
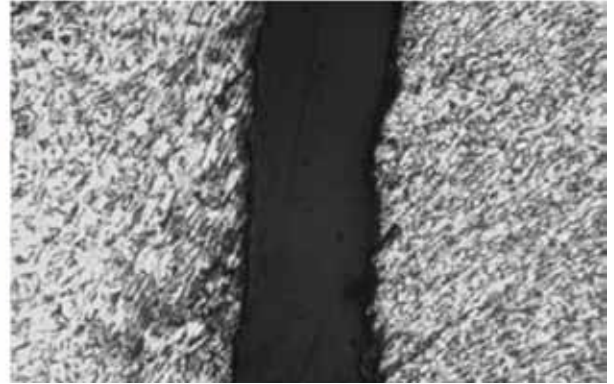
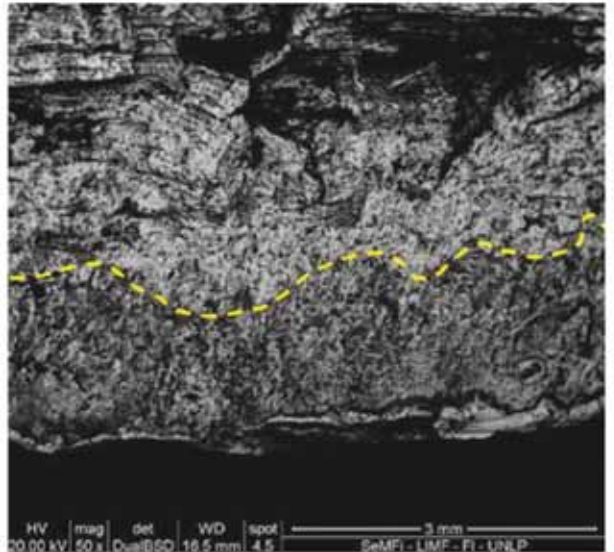


Figura 9. Diferencia de coloración en la zona de defecto.



hipótesis requiere de análisis complementarios para ser confirmada.

Como resultado los análisis EDAX (Figura 11), sobre el defecto evidencia una alta cantidad de silicio y oxígeno que pueden atribuirse a la escoria producida durante el proceso de soldadura.

Element	Wt %	At %
O K	35.18	53.84
NaK	2.21	2.35
MgK	1.36	1.37
AlK	7.70	6.99
SiK	25.67	22.37
P K	0.44	0.35
ClK	0.19	0.13
K K	2.24	1.40
CaK	1.23	0.75
TiK	0.34	0.17
MnK	0.27	0.12
FeK	23.17	10.15
Total	100.00	100.00

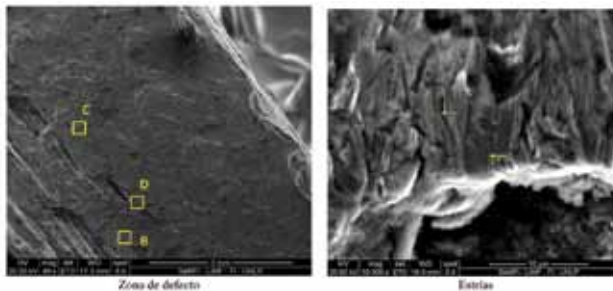


Figura 10. Caracterización de superficie de fractura.

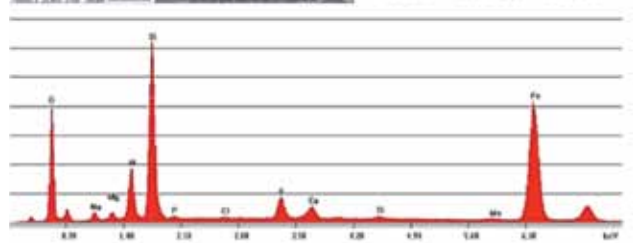


Figura 11. Análisis EDAX.

Se identificó la existencia de un defecto plano de aproximadamente 5 mm de profundidad y 125 de longitud en la soldadura longitudinal (lado externo). Este defecto corresponde al iniciador de la falla. El defecto fue originado en el proceso de soldadura DSAW durante la fabricación del caño. El origen del defecto podría estar relacionado con fusión en la soldadura o posible *weld toe crack*.

Diagnóstico e identificación del mecanismo de falla

Si bien se identificó como iniciador de la falla un defecto en soldadura longitudinal, resulta difícil determinar el fenómeno que produjo el crecimiento hasta el colapso.

El control de calidad, la inspección, la prueba hidráulica previa a la puesta en servicio deben garantizar que no haya defectos volumétricos o defectos tipo fisura significativos remanentes en una tubería. Sin embargo, los defectos que no se detectaron antes de la puesta en servicio pueden

llegar a ser importantes a lo largo del tiempo, debido a los mecanismos de crecimiento que podrían asociarse.

Se identificaron dos hipótesis de crecimiento:

Hipótesis 1

- En la zona de iniciación de la rotura se aprecian al menos tres sectores separados por franjas más o menos longitudinales: falta de fusión en la zona superior del espesor (superficie externa), propagación por fatiga desde la falta de fusión hacia la superficie interior del ducto y colapso del ligamento hasta alcanzar la superficie interior del ducto.
- La morfología de propagación de la fisura es típica de un proceso subcrítico de crecimiento en servicio por fatiga, debido a la amplitud de las variaciones cíclicas de presión durante 42 años de operación del gasoducto.

Hipótesis 2

- Inicio de la fractura a partir de discontinuidad concentradora de tensiones en la soldadura longitudinal de la cañería y propagación fisuras múltiples.
- Mecanismo de daño: fatiga mecánica (LCF y HCF).
- Causas físicas: (eventos preliminares)
 - Discontinuidades concentradoras de tensiones en soldadura DSAW.
 - Interferencia con zona de escurrimiento de agua.
 - Deformación en frío del caño.
 - Baja tenacidad del material.
 - Anisotropía del material (segregaciones, inclusiones no metálicas, bandeados).
 - Vibraciones originadas en la estación compresora próxima.
 - Ciclos de presión del gas normales.
 - Relación D/t elevada.

La fatiga de bajo ciclos (LCF) puede ocurrir cuando, por efecto de deslizamientos del terreno por lluvias o sismos, se producen deformaciones plásticas importantes (arrugas), varias veces (del orden de 3 a 50 ciclos) en la vida del ducto. Mientras que la fatiga de altos ciclos (HCF) corres-

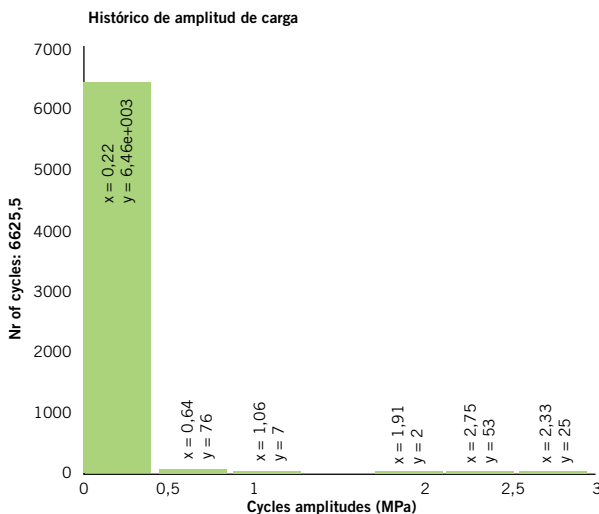


Figura 13. Modelación del defecto s/API 579.

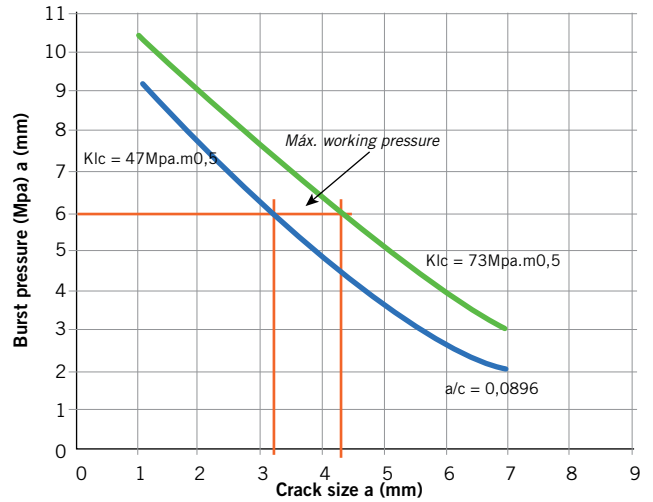


Figura 12. Modelación del defecto s/API 579.

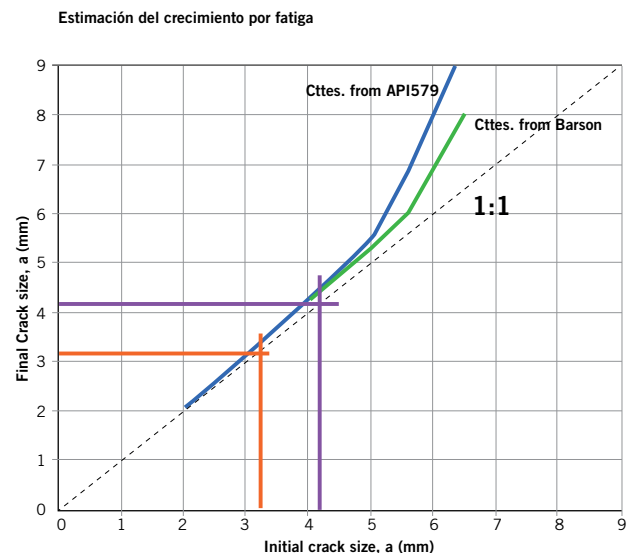
ponde a la asociada con pulsos de presión o vibraciones de alto número de ciclos.

De un primer análisis surge que la hipótesis de crecimiento más importante está asociada a fatiga, aunque no pudo observarse claramente la incidencia de este fenómeno en los análisis de microestructura realizados.

Consideraciones adicionales

Según los valores de *charpy* obtenidos y la relación profundidad/longitud medida se modeló, mediante API 579, el tamaño de defecto que a la presión operativa del ducto produciría una falla (Figura 12). Dependiendo de las consideraciones realizadas el valor estimado se encuentra entre 3,2 a 4,2 mm de profundidad.

Por otro lado, en base a registros histórico de presiones en el ducto de los 10 años anteriores a la falla se realizó el cálculo de ciclos de carga y en función de la ley de París, se determinó que, para los tamaños de grietas iniciales calculados, no se espera un crecimiento significativo del defecto debido a la fatiga (Figura 13).



Tampoco es esperable que el crecimiento pueda estar asociado a fatiga de bajo ciclo relacionada con el medio, dado que la cañería se encontraba en una zona del terreno estable.

Como resultado de los análisis realizados podemos indicar que la falla se produjo por la presencia de un defecto de fabricación asociado a un mecanismo de crecimiento que se encuentra en etapa de análisis.

Medidas implementadas como estrategia de mitigación de riesgo

En base a las características de la falla, TGS ha realizado distintos análisis de causa raíz con grupos especializados en este tipo de anomalías y obtuvo resultados similares. En la actualidad estos análisis, además, están siendo auditados por un ente internacional.

Hasta que no se completaron todos los análisis y las acciones mitigatorias propuestas, se implementó una reducción de la MAPO de la línea en un 5%.

A partir del análisis de parámetros, de ubicación, terreno, operación e integridad históricos y al momento del evento se identificaron áreas con características similares a lo largo del ducto. Se seleccionaron 20 de zonas para evaluación directa, donde se realizaron ensayos de partículas magnéticas y *Phase Array*.

Se analizaron las tecnologías de inspección internas presentes en el mercado para identificar este tipo de defectos. Se decidió realizar una campaña de inspección con tecnología EMAT a 700 km de gasoductos, que actualmente está en ejecución.

Conclusiones

Todas las propiedades químicas y mecánicas del material base y de la soldadura longitudinal del caño fallado están dentro de los valores admisibles definidos por la norma.

Durante las distintas etapas de análisis se descartaron posibles causas de daño como es SCC, *hardspot*, corrosión axial, corrosión general, daños por terceros.

Se identificó la existencia de un defecto plano de aproximadamente 5 mm de profundidad y 125 de longitud en la soldadura longitudinal (lado externo). Este defecto corresponde al iniciador de la falla. El defecto fue originado en el proceso de soldadura DSAW durante la fabricación del caño. El origen

del defecto podría estar relacionado con fusión en la soldadura o posible *weld toe crack*.

Como resultado de los análisis realizados podemos indicar que la falla se produjo por la presencia de un defecto de fabricación asociado a un mecanismo de crecimiento en etapa de estudio.

Atento a antecedentes de la industria se observa un incremento de fallas debidas a defectos en soldaduras longitudinales, queda pendiente el debate para determinar cuál es el mecanismo de crecimiento que produce el colapso, ya que estos defectos superaron las pruebas preoperacionales y los mecanismos de crecimiento, como la fatiga, que no resultan fácilmente demostrables para el caso de cañerías de transporte de gas a alta presión. ■