

DEFECTOS EN SOLDADURA LONGITUDINAL EN GASODUCTOS

Matías Gabriel Poulsen, Transportadora de Gas del Sur S.A.

matias_poulsen@tgs.com.ar

- **Sinopsis**

La gestión de integridad de ductos de más de 40 años de antigüedad requiere que se realicen tareas de investigación y caracterización para comprender y manejar la presencia de defectos planos en Soldaduras Longitudinales que pudieron formarse y permanecer desde la construcción. En la época en la que se fabricaron los caños para estos gasoductos, las exigencias en cuanto a niveles de inspección y controles de calidad no eran tan exhaustivas como son hoy en día, esto sumado a que las pruebas hidrostáticas que se realizaban durante la construcción no alcanzaban los niveles de tensión a los que se llega actualmente, contribuyeron a la formación y permanencia en el sistema de defectos planos en soldaduras longitudinales.

Por otro lado, el desarrollo y perfeccionamiento de nuevas tecnologías de inspección interna como las EMAT, sumado a las técnicas de UT aplicadas en las tareas de evaluación en campo contribuyen a la detección, caracterización y dimensionamiento de anomalías en principio atribuibles al proceso de fabricación, los cuales pueden haber permanecido estables en el tiempo o no.

Aproximadamente el 66 % de los gasoductos que opera tgs (más de 6000 km) fueron construidos entre los años 1952 y 1988; estos ductos son, en su mayoría, de 24", 30" y 36" de diámetro y fueron fabricados con costuras longitudinales tipo DSAW y ERW. Determinar y comprender el origen y la posible propagación de estos defectos a lo largo de los años de operación de los gasoductos es fundamental para evaluar su criticidad y seleccionar las opciones más adecuadas de remediación en caso de ser necesario. En tgs hemos evaluado y recolectado gran cantidad de información y muestras de material este tipo de defectos. El objetivo de este trabajo es compartir los resultados de los ensayos realizados en estas muestras.

- **Introducción**

Los gasoductos de gran diámetro emplean cañerías con soldaduras longitudinales DSAW (soldadura de doble arco sumergido) o ERW (soldadura por resistencia eléctrica), cuya calidad en la ejecución es crítica para la integridad del sistema.

El avance en las tecnologías de inspección interna (ILI) ha mejorado la detección de anomalías en estas soldaduras, principalmente defectos planos que comprometen la resistencia ante esfuerzos circunferenciales. A pesar de esto, la gestión de estas indicaciones ha seguido criterios conservadores debido a ciertas limitaciones en la caracterización geométrica de las herramientas ILI. Si bien este enfoque reduce el riesgo, genera un alto volumen de excavaciones y reparaciones en defectos que no siempre representan una amenaza estructural real. En la industria este conservadurismo tiene su fundamento en el historial de fallas en servicio de estas soldaduras. Los eventos relacionados con estas fallas han traído consigo graves consecuencias debido al daño generado a terceros, a la reputación, al medio ambiente y a la calidad del servicio de transporte.

En TGS (Transportadora de Gas del Sur S.A.) han acontecido incidentes relacionados con estos defectos en soldaduras longitudinales. Si bien estos no generaron mayores daños debido a su localización geográfica, han dado una idea acabada de las consecuencias de estos reventones.



Fig. 1. Falla en soldadura longitudinal ERW; combinación de baja tenacidad/defectos planos en soldadura y SCC.



Fig. 2. Falla en soldadura longitudinal DSAW; combinación de defectos planos interno y externo de fabricación.

Ante este escenario, TGS viene desarrollando acciones para determinar el origen de estas discontinuidades y diferenciar entre defectos de fabricación estables y aquellos con potencial de propagación en servicio. La evidencia de campo indica que muchos de estos defectos permanecen estables tras décadas de operación; sin embargo, esta estabilidad no suele integrarse sistemáticamente en la toma de decisiones.

Este trabajo propone revisar el enfoque tradicional mediante el contraste entre los supuestos normativos y la evidencia experimental. Se presentan los hallazgos más significativos derivados de análisis metalúrgicos y ensayos de laboratorio realizados sobre muestras reales, con el fin de optimizar los criterios de aceptabilidad y reparación.

- **Desarrollo**

Como parte de las tareas incluidas en el Plan de Gerenciamiento de Integridad, TGS viene realizando desde hace años campañas de inspección interna mediante pasaje de herramientas inteligentes. Se emplean distintas tecnologías como TFI (Pérdida de Flujo Magnético Transversal) y EMAT (Transductor Acústico Electromagnético) para la detección de anomalías longitudinales. Además, durante las obras de recobertura de gasoductos se inspeccionan las costuras longitudinales mediante Inspección Visual Externa, Partículas Magnetizables, Ultrasonido Angular y Gammagrafía según sea requerido. Estas actividades han generado un vasto volumen de datos, derivando en campañas de verificación en campo donde las indicaciones críticas, tras ser evaluadas mediante END (Ensayos No Destructivos), fueron retiradas de servicio.

Se enviaron a laboratorio algunas de estas muestras de caños, las que pertenecían a los gasoductos LGSM (Libertador General San Martín) y Neuba I construidos mayoritariamente entre las décadas del '60 y del '70 y Neuba II construido a fines de la década del '80, y fabricados en aceros al carbono grado API 5L X52 y X60. Los diámetros analizados se encuentran en el rango típico

de gasoductos troncales: 24" (610 mm) a 30" (762 mm), con espesores nominales que varían entre los 7,14 mm y 8,74 mm. En cuanto a los procesos de fabricación, casi la totalidad de los caños evaluados corresponden a soldaduras longitudinales DSAW, incorporándose también una muestra de un caño fabricado mediante ERW.

Gto.	Tramo	Tipo soldadura	Defecto	Cantidad muestras	Año fabricación
LGSM	Bosque-Pico	DSAW	SE	1	1973
	Holdich-Salamanca	DSAW	DL	2	1965
	Dolavon-Gualicho	DSAW	FC; PO	2	1965
	Gualicho-San Antonio	DSAW	DL; EA; FC; PO; RD; SE	21	1965
	Cerri-La Sortija	DSAW	RD	2	1965
	La Sortija-Tandil	DSAW	FC	3	1965
Neuba I	Chelforó-Fortín I	ERW	FP	1	1970
	Cerri-La Sortija	DSAW	FC	1	1974
Neuba II	La Adela-Cerri	DSAW	FC; FF	3	1988
	Altavista-Saturno	DSAW	RD	1	1988

SE: Socavado Excesivo; DL: Desgarre Laminar; FC: Fisuración en Caliente; EA: Escoria Atrapada; PO: Poros; RD: Reparación Defectuosa; FP: Fisura por Fatiga; FF: Falta de Fusión

Tabla 1. Resumen muestras analizadas

La caracterización de los defectos incluyó, según el caso, ensayos metalográficos, fractográficos, análisis químicos, aperturas criogénicas y ensayos mecánicos (tracción e impacto Charpy), permitiendo determinar tanto la naturaleza y el origen de las discontinuidades como la presencia o ausencia de propagación en servicio. En varios casos, se contó además con evidencia de antigüedad del defecto, tales como productos de corrosión en superficies de fisura o morfologías compatibles con propagación inicial arrestada.

En conjunto, la base de datos analizada reúne un número significativo de casos reales de defectos en soldaduras longitudinales, abarcando distintos tipos de discontinuidades y mecanismos de daño. Esta diversidad constituye uno de los principales aportes del presente trabajo, al permitir contrastar los supuestos conservadores comúnmente utilizados en evaluaciones de integridad con evidencia experimental y observaciones directas del comportamiento en servicio.

- **Caracterización del material**

Desde el punto de vista químico, los aceros analizados presentan composiciones compatibles con los rangos normativos, aunque en varios casos se observaron contenidos relativamente elevados de elementos como carbono, azufre y fósforo. Estas características, propias de aceros producidos en décadas anteriores, resultan relevantes para interpretar la susceptibilidad a determinados defectos de soldadura, en particular fisuración en caliente y segregaciones interdendríticas.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los ensayos de tracción y de impacto Charpy evidenciaron una dispersión significativa entre material base, metal de soldadura y zona afectada por el calor. En general, el material base presentó las peores combinaciones de tenacidad y temperatura de transición, mientras que la ZAC (Zona Afectada por el Calor) mostró, en numerosos casos, valores de energía absorbida superiores y menor temperatura de transición. Estas diferencias locales de comportamiento mecánico resultan determinantes para explicar fenómenos de iniciación, propagación y arresto de defectos longitudinales observados durante el análisis fractográfico.

- **Tipología de defectos en soldaduras longitudinales**

A partir del análisis integrado de los informes de laboratorio y las verificaciones en campo, los defectos longitudinales evaluados fueron agrupados en distintas clases, ya que por sus tipologías presentan morfologías, concentraciones de tensiones y comportamientos mecánicos distintos, lo que impide tratarlas de manera homogénea desde el punto de vista de la integridad estructural.

En el próximo apartado se profundizará en los resultados de los estudios cada una de estas categorías.

- **Fisuración en caliente**

La fisuración en caliente es un defecto que se forma durante la solidificación de la soldadura, debido a que ésta ocurre en condiciones de no equilibrio. Esto genera la segregación de los elementos de menor punto de fusión hacia el último sitio en solidificar, promoviendo el crecimiento dendrítico. Así, la resistencia de la línea media se ve significativamente reducida debido al alto contenido de soluto y al crecimiento dendrítico haciendo que, en muchos casos, las tensiones de origen térmico que la soldadura experimenta durante el enfriamiento, alrededor de la línea de solvus, sean suficientes para iniciar una fisura. Está demostrado que la susceptibilidad a la fisuración en caliente aumenta con el incremento de carbono, azufre, fósforo, silicio y níquel, mientras que el molibdeno y el vanadio la reducen.

La fisuración en caliente está presente en más del 30 % de las muestras analizadas y más del 50 % de las indicaciones fueron detectadas por inspecciones que no derivaron de los resultados de las herramientas ILI.

En todos los casos donde se pudieron evaluar las superficies expuestas mediante apertura criogénica se encontraron recubrimientos de óxidos y productos de corrosión con la impronta dendrítica original, indicando que la fisura estuvo presente desde la fabricación del caño. Si bien se identificaron defectos de profundidad considerable (hasta 7,8 mm), el análisis de las puntas de grieta no reveló signos de propagación en servicio en la mayoría de los casos. No obstante, desde el punto de vista de la gestión de integridad, estas fisuras se clasifican como concentradores de tensión severos que reducen el factor de seguridad de la tubería, justificando su remoción tras la detección por herramientas EMAT/TFI y posterior implementación de Ensayos No Destructivos en campo.

Uno de los casos más interesante y representativo para profundizar es el del Caño 98360 del Gasoducto Neuba II, tramo La Adela-Ceri. En el centro de la sobremonta de la soldadura

longitudinal (DSAW) del lado externo se encontró un defecto que inicia sobre la superficie externa y que se extiende hacia el interior del espesor por 6,14 mm, hasta el comienzo de la pasada de la soldadura interna. Los cordones de soldadura presentaron una importante desalineación entre sí, medida en 7,14 mm. La herramienta EMAT reportó 2,6 mm de profundidad en ese defecto; es posible que esta dificultad para caracterizar correctamente la profundidad se deba a la importante desalineación presente entre soldaduras.

La microestructura alrededor del extremo inferior de la fisura es ferrítico-perlítica y no presenta las típicas dendritas de la zona afectada por el calor, debido al tratamiento térmico que sufrió el material durante la pasada de soldadura del lado interior (detalle a 100x, Fig. 3). No se observan signos de propagación en servicio, dejando en claro que, en este caso, la secuencia de fabricación pudo estabilizar un defecto severo.

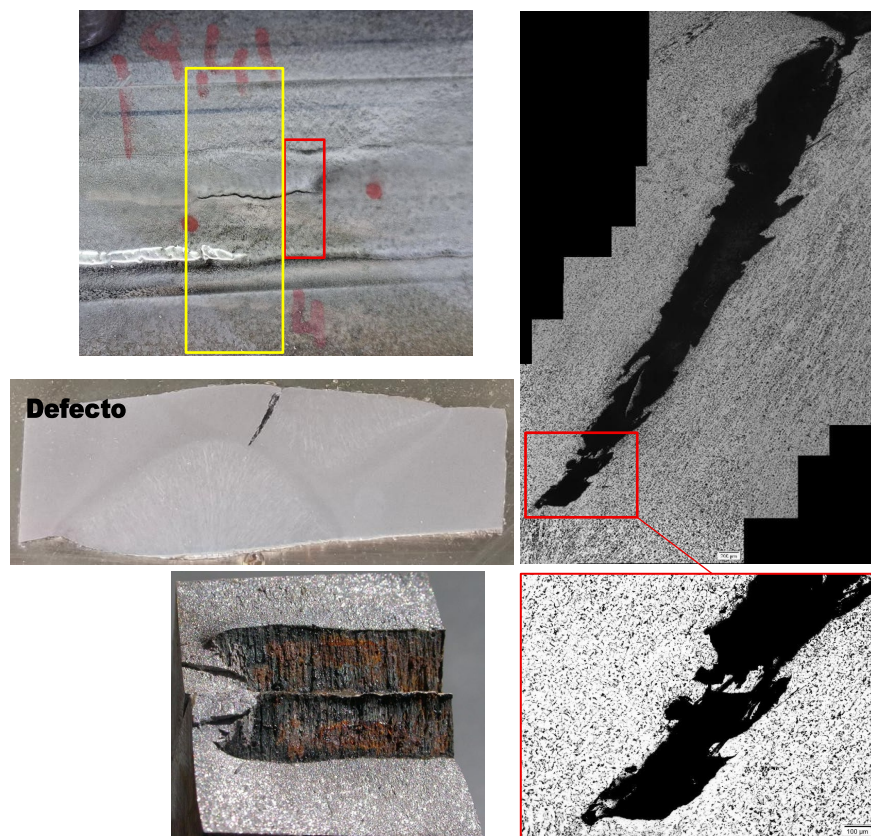


Fig. 3. SR 98360. Probeta metalográfica de corte circunferencial sobre defecto 4.
Microscopía óptica 50x y 100x. Nital 2 %.

Si bien, como se indicó anteriormente, la fisuración en caliente representó casi un tercio de los defectos analizados, se muestra el de la SR 98360 por ser uno de los más representativos y concentrar en él gran parte de los hallazgos característicos en este tipo de defectos.

○ Desgarro Laminar

El desgarro laminar es un fenómeno de fractura que se manifiesta en el metal base, particularmente en sectores adyacentes a la ZAC. A diferencia de otras fallas de fabricación, su origen no reside en el proceso de soldadura per se, sino en la anisotropía de las propiedades

mecánicas del acero de las chapas. La presencia de inclusiones no metálicas, predominantemente sulfuros de manganeso (MnS) y silicatos, que han sido deformados y aplanados durante el proceso de laminación de la chapa, genera planos de debilidad paralelos a la superficie.

La falla se desencadena cuando las tensiones térmicas, actuando en la dirección del espesor (dirección Z), superan la baja ductilidad del material en esa orientación, provocando el despegue de las interfaces inclusión-matriz. Este mecanismo se distingue por su apariencia escalonada.

Se analizaron 5 muestras, pertenecientes a 2 caños distintos del gasoducto Libertador General San Martín: un caño del tramo Gualicho-San Antonio Oeste y el restante del tramo Holdich-Salamanca; ambos caños fueron construidos en el año 1965. En todas las muestras analizadas, la característica más recurrente es la morfología escalonada del defecto. Esta apariencia, que se asemeja a los peldaños de una escalera en los cortes transversales, responde a la unión de múltiples microfisuras que corren paralelas a la superficie de laminación, conectadas por pequeños desgarros transversales.

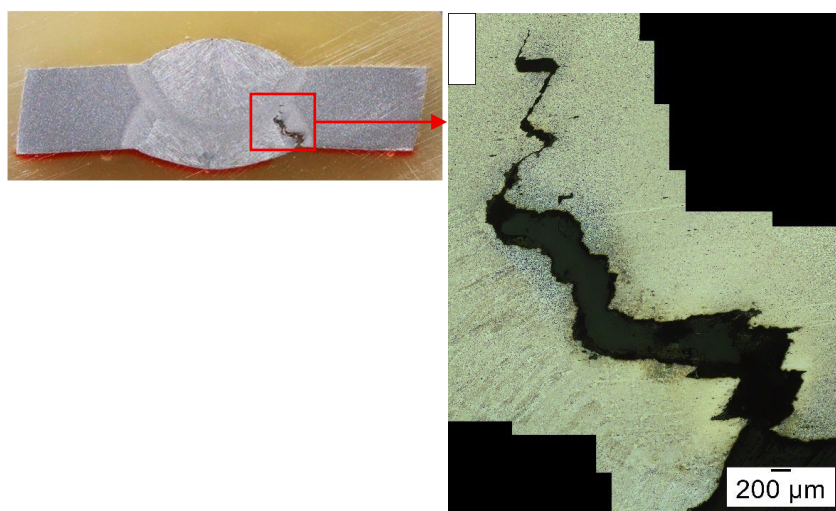


Fig. 4. Caño 48840. Defecto B*. Desgarro laminar. Microscopio óptico x100. Nital 2 %.

Al someter las probetas a rotura mediante nitrógeno líquido, se logró una diferenciación nítida en la cara de la fractura: por un lado, una apariencia frágil y brillante inducida por el laboratorio; por el otro, la superficie original del defecto, que presenta una textura fibrosa y opaca. Esta zona preexistente es la evidencia física del desgarro laminar, donde se observa cómo el material se "deshoja" siguiendo las líneas de debilidad interna.

Se identificó en las muestras la presencia de inclusiones no metálicas, con altos contenidos de calcio, manganeso, fósforo y azufre según se desprende de la observación mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Este fenómeno es una característica intrínseca de los aceros de esa antigüedad, que carecían de tratamientos modernos de limpieza o control de inclusiones.

Si bien comúnmente el desgarro laminar arresta en una laminación paralela, el análisis arrojó una excepción crítica en el Caño 110500 (Tramo Gualicho-San Antonio del Gasoducto Libertador General San Martín). A diferencia del patrón de "defecto estático", esta pieza mostró señales de propagación en servicio. Lo que hace notable a este caso es que el desgarro laminar no permaneció confinado a su plano original, sino que, bajo la influencia de tensiones cíclicas de presión, logró generar fisuras de vinculación transversal que conectan distintos niveles de laminación.

En la figura 5 se pueden apreciar en a) y b) laminaciones presentes en el metal base y c) superficie de fractura luego de apertura criogénica. En esta última se observan distintas coloraciones indicando distintos momentos de propagación y una apariencia escalonada, compatible con desgarro laminar.

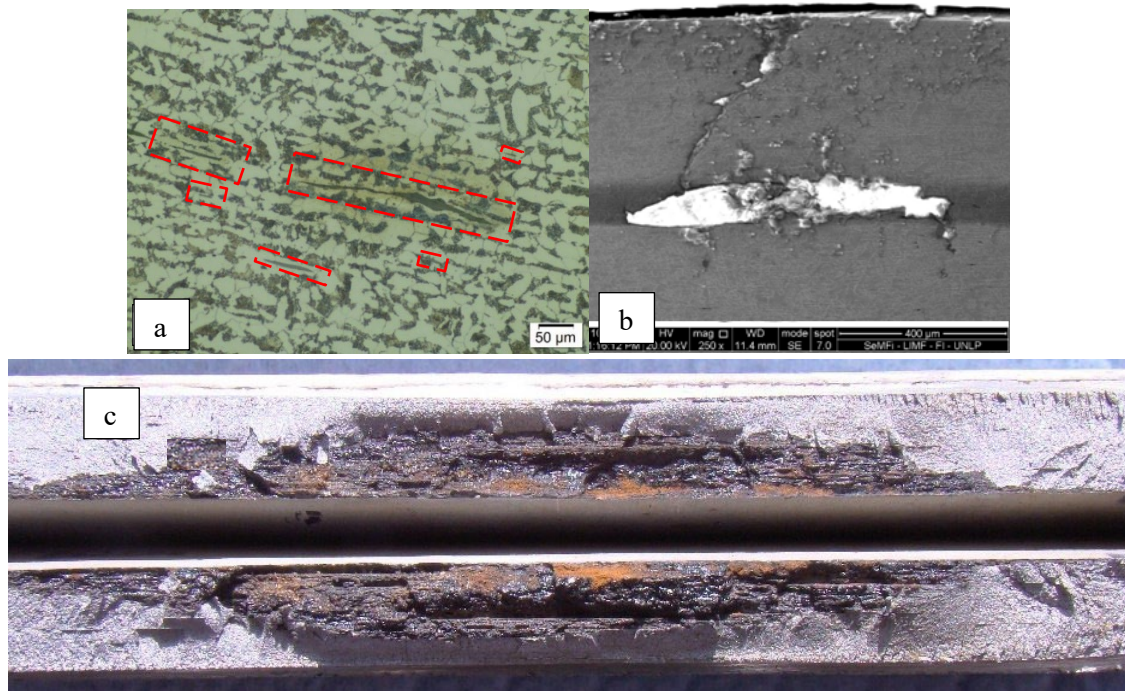


Fig. 5: Defecto “15” del caño 110500.

La evidencia demuestra que, aunque son defectos de fabricación, su interacción con regímenes de carga cíclica puede activar mecanismos de propagación que requieren una vigilancia estrecha en la gestión de integridad.

○ Poros

La porosidad presente en las costuras longitudinales responde a la oclusión de gases durante la solidificación de la piletta líquida. Aunque la normativa suele considerar a los poros como defectos de baja severidad debido a su geometría redondeada y baja concentración de tensiones, los ensayos de laboratorio revelaron que su criticidad aumenta drásticamente cuando su tamaño es excesivo o cuando interactúan con otras discontinuidades de soldadura.

Si bien en muchas de las muestras enviadas a laboratorio fueron encontrados poros generados durante reparaciones de soldaduras longitudinales en fábrica, se presentará a continuación un caso de poro proveniente de fabricación no asociado a reparaciones; este es el caso del caño 86240 del tramo Dolavon-Gualicho del Gasoducto Libertador General San Martín. Este tramo fue construido en el año 1965, con caños API 5L X52 y soldadura longitudinal DSAW. Este defecto resultó ser pasante por convergencia de dos poros de gran tamaño ubicados en los cordones interior y exterior. Se determinó que solo fue necesaria una propagación de sólo unas décimas de milímetro en servicio para que ambos poros se conectaran, transformando dos defectos internos en una vía de escape de fluido (fuga).

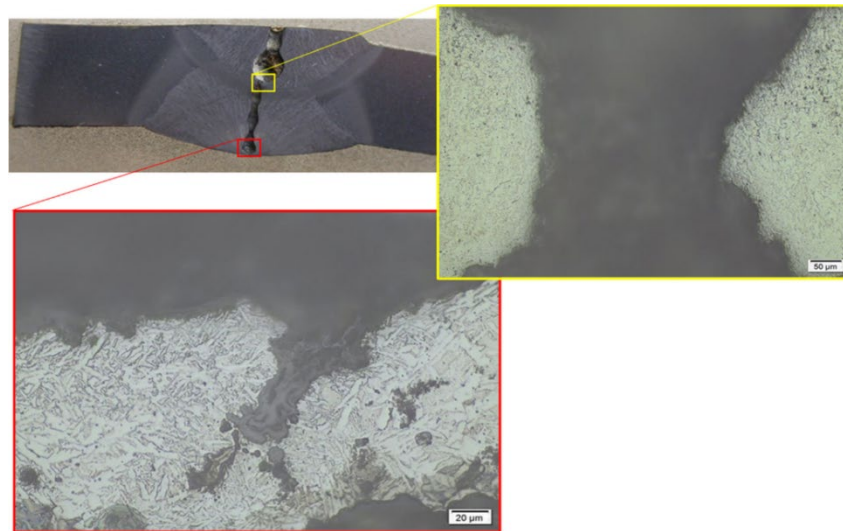


Fig. 6. Caño 86240. Poro pasante. En amarillo la unión entre ambos poros. En rojo, extremo de poro interior. Pequeña fisura con propagación en servicio. Microscopía óptica. Nital 2 %.

○ Defecto en ERW propagado por fatiga

Se analizó una muestra de caño API 5L X52, de 24" (610 mm) de diámetro, un espesor nominal de 7,14 mm y soldadura longitudinal ERW. Esta muestra pertenece al Gasoducto Neuba I, construido en el año 1970. A diferencia de los defectos detectados en soldaduras de doble arco sumergido, esta pieza presentó una falla pasante de 34 mm de longitud en su cara externa y de 10 mm de longitud en su lado interno, cuya morfología está intrínsecamente ligada al proceso de terminación del tubo durante su fabricación.

En la superficie de fractura (Fig. 7) se observan marcas de playa, con distintos grados de oxidación, típicas de un proceso de fatiga o corrosión-fatiga. Se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) que, por el alto grado de corrosión superficial, no fue concluyente. Si bien no se pudo hallar el sitio preciso de la iniciación, en base a la simetría de la fisura y las inspecciones interna y externa, se considera que se encontraba en metal de soldadura, aproximadamente en la línea de fusión.

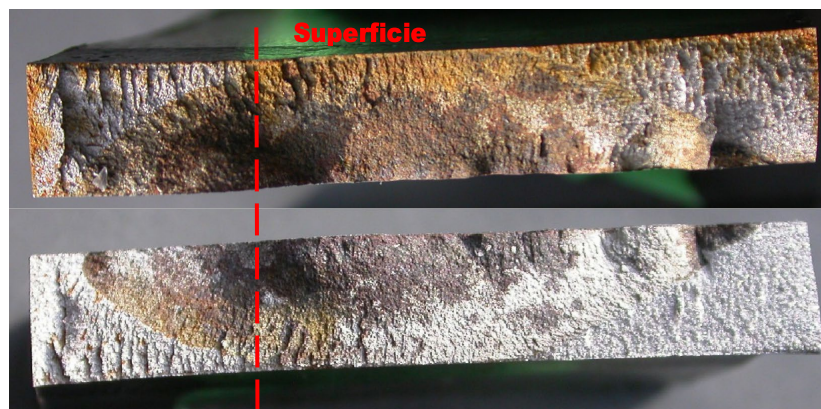


Fig. 7. Caño 48330. Defecto 1_1, pasante. Superficie de fractura. Se observan marcas de playa. Línea punteada indica zona de corte para probeta metalográfica.

El análisis metalográfico se llevó a cabo en una probeta de sección transversal que se indica en la Fig. 7 con línea roja punteada. En la Fig. 8, se observa la presencia de la línea de fusión de la soldadura ERW seguida de una ZAC muy ancha que da cuenta de un gran aporte de calor. Lejos de la soldadura, se encontró una microestructura ferrítico-perlítica, típica de un acero API 5L X52.

En la Fig. 9 se muestran en detalle los surcos de la superficie externa (microscopía óptica, en recuadro anaranjado de la Fig. 8).

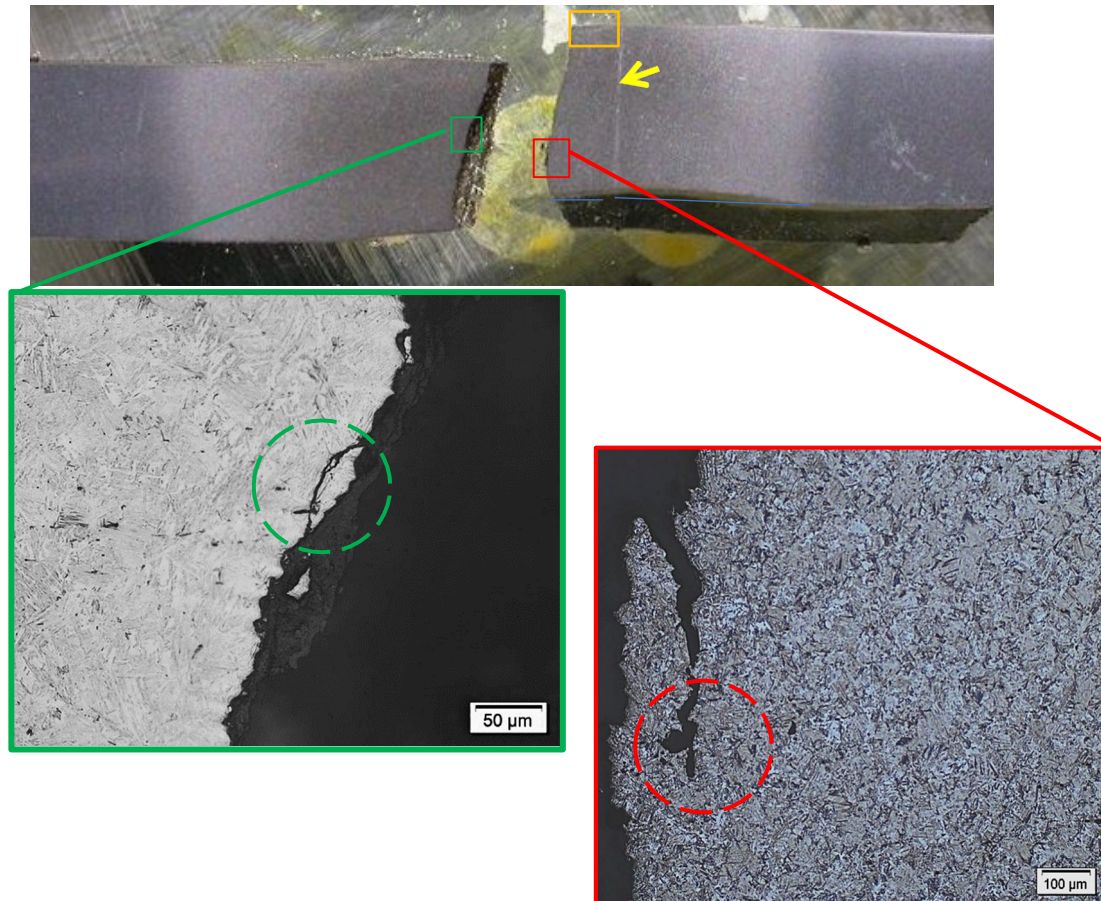


Fig. 8 Caño 48330. Defecto 1_1. Probeta de corte circunferencial. Nital 2%. Fisura en ZAC ERW. En verde, propagación secundaria transgranular. En rojo, fisuración-corrosión. Flecha amarilla señala línea de fusión.

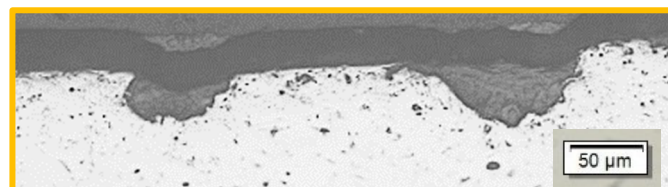


Fig. 9: Surcos en superficie externa (zona recuadro anaranjado en Fig. 8).

Existen varios factores que colaboraron para la propagación por fatiga o corrosión-fatiga de la fisura: en primer lugar, la fisura inició en metal de soldadura, una zona con muy baja absorción de energía al impacto, y propagó tanto por metal de soldadura como por ZAC, zona que también

mostró tener baja resistencia al impacto. El límite de fatiga de los materiales decrece con bajos valores de energía absorbida. Adicionalmente, en la zona de iniciación, se observaron marcas superficiales (surcos), producidos probablemente durante el proceso de fabricación para la remoción del material excedente de la ERW, los cuales son sitios propicios para la iniciación de grietas por fatiga.

Por último, las soldaduras poseen siempre tensiones residuales, tanto de tracción como de compresión. En los sitios en que dichas tensiones son de tracción, la resistencia a la fatiga del material ve disminuida puesto que, aunque la amplitud de los ciclos sea la misma, la carga máxima (y también la mínima) es mayor. El ancho de la ZAC en la soldadura ERW observado es significativamente mayor a lo típicamente observado en soldaduras de este tipo, lo que da cuenta de un aporte de calor mayor y de un proceso de fabricación no debidamente controlado. Al aumentar tanto el volumen de la ZAC, pueden aumentar drásticamente las tensiones residuales.

○ **Escoria atrapada**

Del total de muestras analizadas, una de ellas, presentó escoria atrapada en la soldadura longitudinal. Para su estudio se realizaron dos probetas (P26 y P38); a pesar de estar distanciadas 1 centímetro entre sí, cada una mostró un aspecto distinto. Antes de proceder a los cortes, se detectó visualmente un poro de 1,5 mm de diámetro abierto a la superficie externa y en el lado interno se observó una zona de la soldadura que había sido amolada durante el proceso de fabricación del caño, lo cual indicaría ser una reparación defectuosa. Por otro lado, esta intervención no se refleja de igual manera en la cara externa, donde la soldadura mantiene una apariencia más uniforme, salvo por la presencia del poro ya mencionado. La desalineación entre cordones fue de 2,3 mm, la sobremonta interior en 2,5 mm y sobremonta exterior de 1,6 mm.

Mediante el estudio de la microestructura se pueden identificar dos pasadas de soldadura en la cara interna del ducto, siendo la última de reparación.

A pesar de la magnitud de la escoria atrapada y las irregularidades geométricas mencionadas, el estudio concluyó que no hubo propagación en servicio. El defecto se mantuvo estable, confirmando que la escoria, al ser una inclusión redondeada y volumétrica, posee una peligrosidad menor frente a mecanismos de fatiga en comparación con los defectos planares observados en otros sistemas, siempre que no existan concentradores de tensión adicionales que activen su crecimiento.

A través del análisis metalográfico en la probeta P38, se observa una discontinuidad de gran tamaño en la pasada exterior de soldadura compatible con escoria atrapada, mayor parte de la cual se desprendió durante la preparación de la probeta. En la parte interna se puede ver la presencia de un cold lap. Se midió una sobremonta interior de 3,25 mm y una desalineación de 2,05 mm. Es probable que la reparación detectada en la otra probeta haya sido para reparar una zona de escoria atrapada y que este defecto haya quedado fuera de la zona reparada, puesto que en esta probeta se observan sólo dos pasadas y rastros de mecanizado externo.

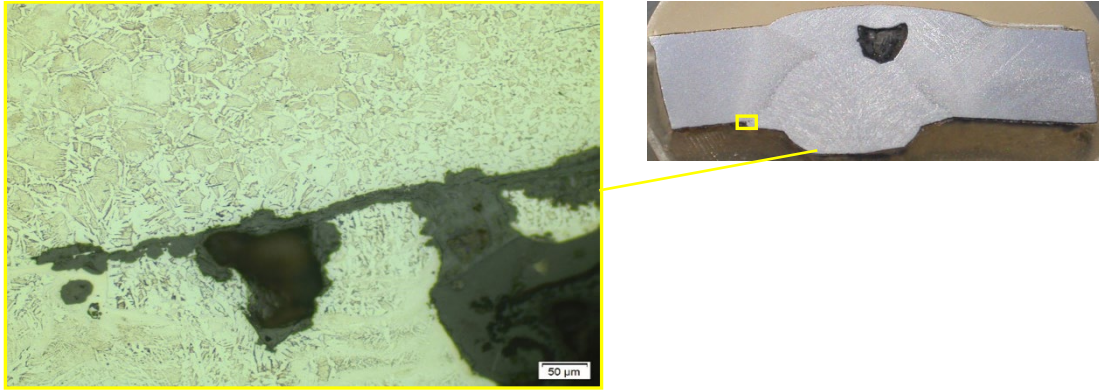


Fig. 10. Caño 110040. Defecto B*. Probeta metalográfica P38, Nital 2 %

Un aspecto técnico relevante en este caño es la combinación de factores geométricos y metalúrgicos. Se midió una desalineación entre cordones de aproximadamente 2,3 mm y una sobremonta interna de hasta 3,25 mm. Además, en el sector interno se detectó la presencia de un cold lap (falta de fusión por desbordamiento), lo que refuerza la hipótesis de una ejecución deficiente de la soldadura de reparación.

○ **Falta de fusión**

Este defecto ocurre cuando no hay disolución entre el metal de soldadura y el metal base y no se produce cohesión entre ambos materiales. Es consecuencia de un proceso inadecuado de soldadura, ya sea por parámetros incorrectos, impurezas que impiden la fusión del metal base, entre otros. Según bibliografía, su probabilidad de propagación durante el servicio es media. Si bien se trata de defectos planos generalmente orientados de forma que son afectados por las tensiones principales, sus extremos son redondeados, disminuyendo su severidad. La misma, depende entonces, de los distintos mecanismos con los que se puedan combinar y de su tamaño.

En la muestra analizada, en la unión de la pasada de soldadura interna y la soldadura externa se encontró un defecto embebido de 2,18 mm de profundidad. Esta discontinuidad plana que se observa es la unión de los bordes del fleje curvado que da origen al tubo, y se corresponde con una falta de fusión (Fig. 11).

En tubos antiguos, el centrado del electrodo en la junta era hecho mecánicamente y las desalineaciones eran frecuentes, a tal punto que los tubos más antiguos eran de solo 6 metros para evitar este tipo de defectos a lo largo costuras más largas. Las dos pasadas, tienen en el caso en estudio desalineación entre ellas, pero la desalineación más relevante es con la junta inicial, que llega a ser del orden de la mitad del espesor. Los cordones de soldadura presentan una desalineación entre sí de 6,08 mm, la sobremonta interior es de 4,05 mm y la exterior de 2,39 mm. No se observan signos de propagación en servicio.

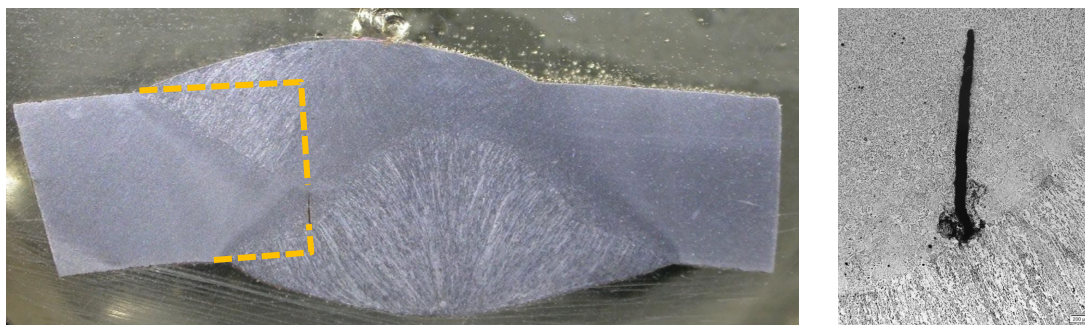


Fig. 11. SR 14280. Metalografía del corte circunferencial sobre defecto 1. Microscopía óptica 50x. Nital 2 %.

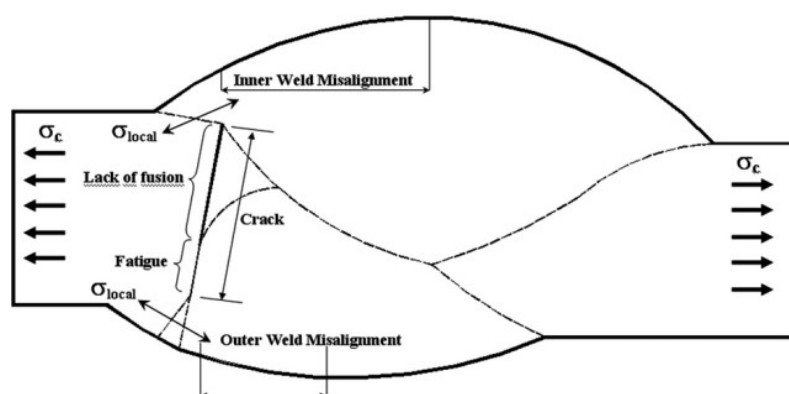


Fig. 12. Esquema del corte circunferencial.

○ Reparaciones defectuosas

El siguiente inciso se presenta de esta forma dado que, más allá de la categorización que reciba cada defecto, todos se originan a partir de reparaciones realizadas en fábrica sobre la soldadura longitudinal. En estos casos la probabilidad de propagación en servicio es alta, debido a que representan un alto concentrador de tensiones.

Fueron analizadas 12 muestras de 5 caños distintos, todos de caños de 30 pulgadas de diámetro, API 5L X52 de 8,74 mm de espesor nominal y fabricados en 1965 a excepción de uno de ellos que fue fabricado en 1988 y es X60.

A modo informativo, se presentarán varios casos.

a) Gasoducto Libertador General San Martín, Tramo Gualicho – San Antonio, Caño 110030

En la superficie interna del caño se halló una zona con soldadura defectuosa, en la que una parte del material contiguo a la sobremonta quedó sin soldar. Se realizaron tres probetas metalográficas y en todas ellas se encontraron indicios de propagación en servicio. En una de ellas se encontraron pruebas de que el material había sufrido una reparación, puesto que luego del metal de soldadura, la zona afectada por el calor de grano grueso (ZAC) y la zona de grano fino aparece nuevamente material con una microestructura que presenta recristalización. Esto se evidencia en la pérdida del bandeo característico del metal base (ver Fig. 13).

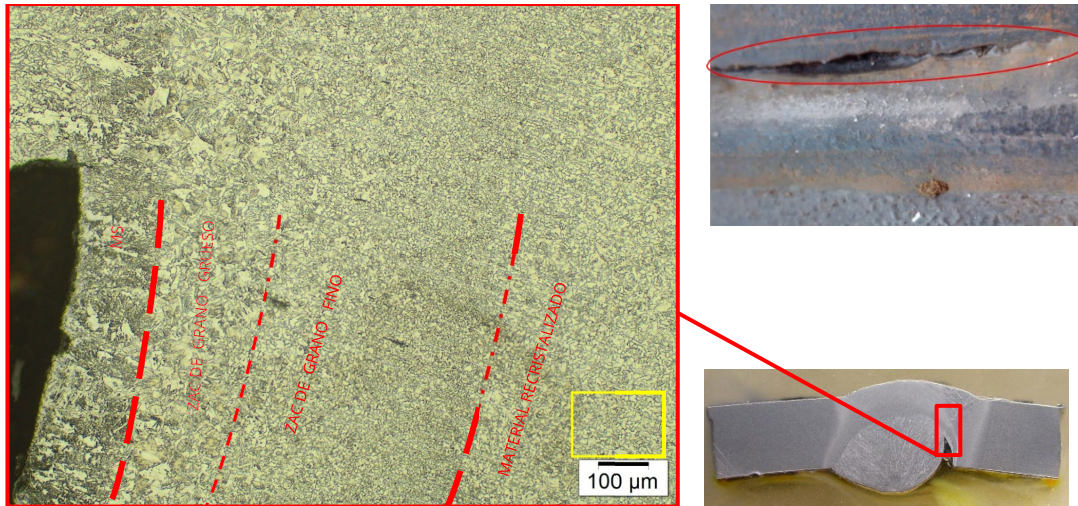


Fig. 13: Superficie interna del caño y macrografía del defecto. En la imagen de la izquierda se observan distintas líneas de zonas afectadas térmicamente.

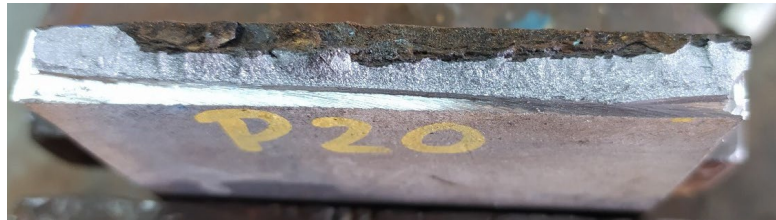


Fig. 14: Apertura criogénica del defecto en el caño 110030. Se observa que el defecto alcanza casi la mitad del espesor.

b) Gasoducto Libertador General San Martín, Tramo Gualicho – San Antonio, Caño 117720

Defectos D* (P37) y B* (P40)

Estos defectos se extrajeron de zonas aledañas, como se observa en la Fig. 15. La probeta P40 corresponde a un corte longitudinal centrado en la soldadura exterior y atravesó la zona de poros. La probeta P37 corresponde a un corte circunferencial y atraviesa una indicación lineal.



Fig. 15: Zona de extracción de las probetas P40 (Defecto B*) y P37 (Defecto D*).

En la Fig. 16 se observan las macrografías de ambas probetas metalográficas y se señalan con líneas punteadas los puntos equivalentes. Se trata de dos vistas distintas de una misma soldadura. La P37 contiene una fisura desde el talón de la soldadura interior, hasta lo que probablemente fue el límite de la primera pasada de soldadura anterior, antes de la reparación. En la probeta P40 (izq.), que corresponde a un corte longitudinal, se observan poros alineados a la mitad del espesor.

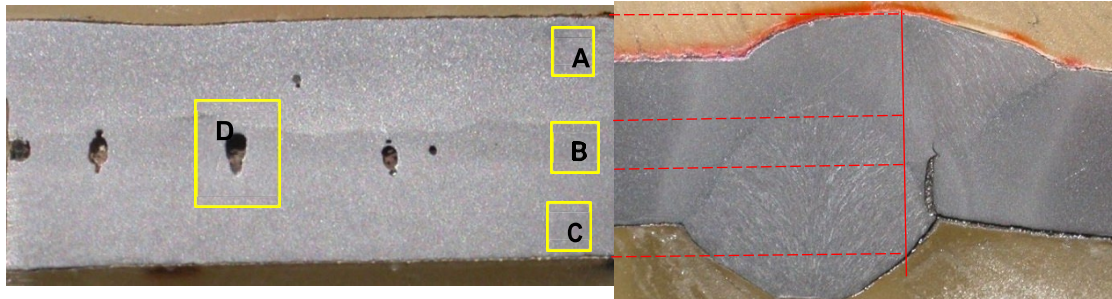


Fig. 16: Probetas P40 (izquierda) y P37 (derecha). Se indica con línea de puntos las zonas equivalentes entre ambos cortes.

En la Fig. 17 se muestran las microestructuras que atraviesa la fisura de la probeta P37. La fisura inició en un defecto por falta de fusión de la primera pasada exterior y luego propagó hacia adentro y hacia afuera. La propagación hacia el interior del caño está claramente gobernada por tensiones, ya que propaga forma transgranular y rectilínea a través del espesor, atravesando una zona de baja tenacidad correspondiente a la ZAC de grano grueso, hasta las cercanías de un cold lap en el talón de la soldadura interior, en donde ambos defectos coalescen. Hacia el lado externo del caño, en cambio, la fisura se arresta al alcanzar la línea de fusión de la pasada exterior, porque llega a una zona de grano fino recrystalizado por el “revenido” de las subsiguientes pasadas de soldadura, la cual mostró tener altísima tenacidad. No se halló evidencia de propagación en servicio.

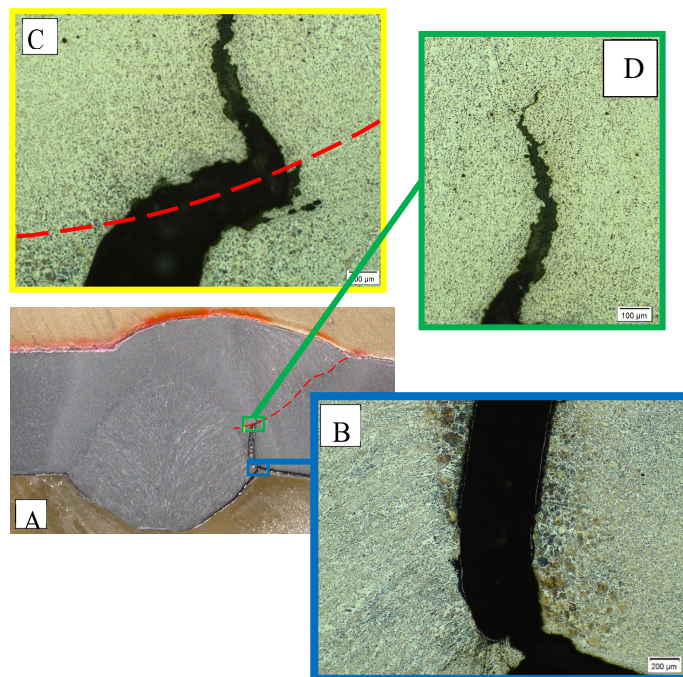


Fig. 17: Probeta P37. A) Macrografía. B) Inicio de fisura desde cold lap en talón y continúa por ZAC de grano grueso. C) Cambio de dirección de propagación. D) Punta de fisura.

Defecto C* (P41)

Hacia el final de la zona indicada en los reportes de TGS con defectos, se realizó otra probeta metalográfica. Se observó la misma estructura que en las probetas anteriores (reparada) y una falta de fusión en la última pasada de soldadura. Se observó que no hubo propagación del defecto en servicio.

c) Gasoducto Libertador General San Martín, Tramo Gualicho – San Antonio, Caño 124200

Defectos A y B

Se envió a laboratorio una muestra conteniendo los defectos denominados A y B, ubicados en la zona central del caño, a las que se le realizaron probetas metalográficas y aperturas criogénicas. En la Fig. 18 se observa el defecto A, interno, que corresponde a una escoria atrapada en la pasada anterior a la reparación.

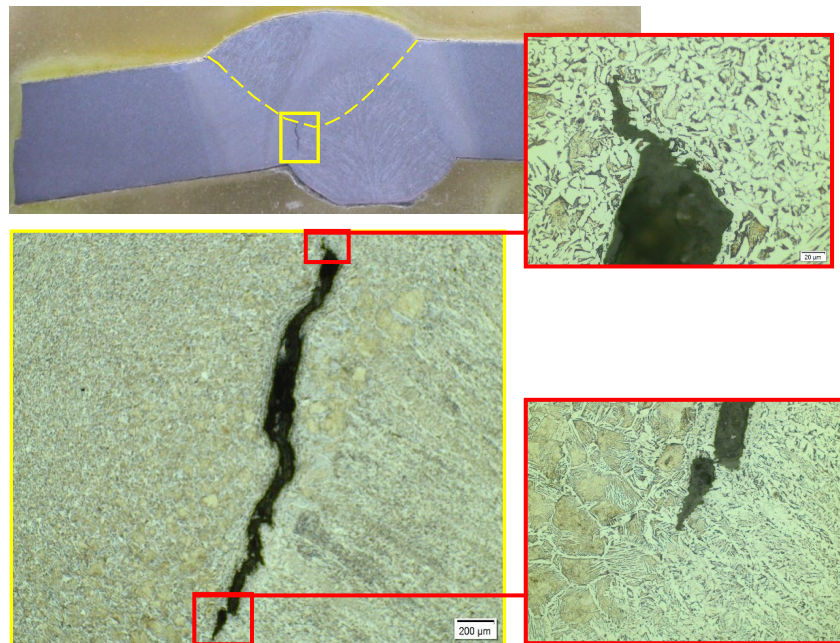


Fig. 18 Defecto A. Se señala fisura correspondiente a reparación defectuosa. Debajo, foto de microscopía óptica. 50X. Nital 2 %.

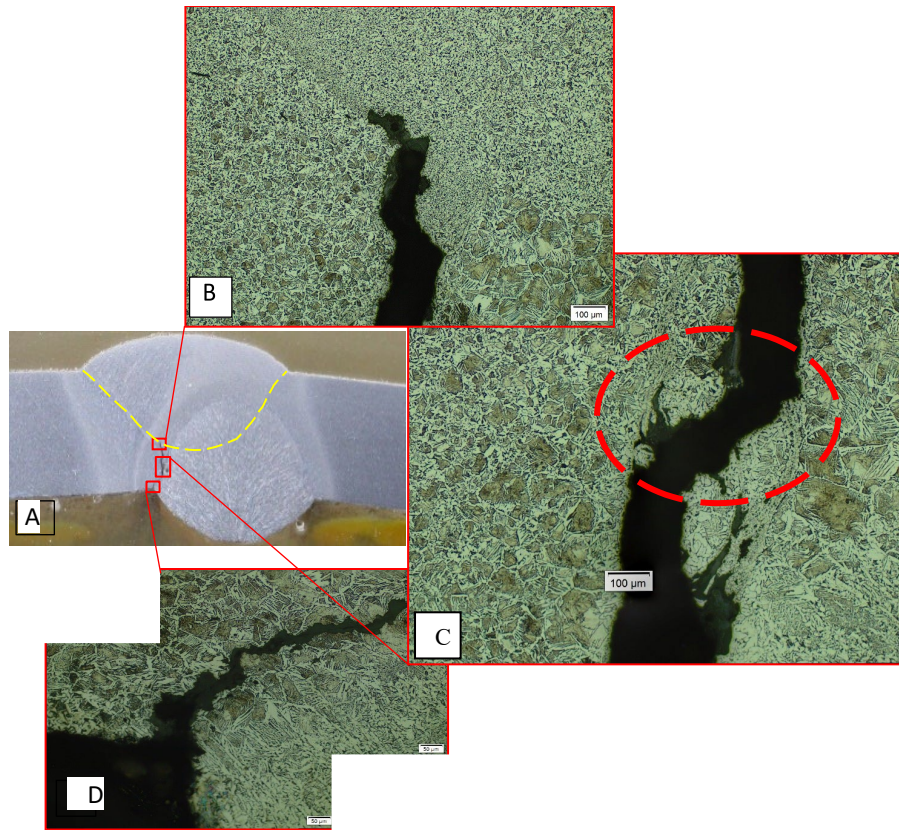


Fig. 19. Caño 124200. Defecto B.

En la Fig. 19 (defecto B), se observan tres zonas de distinta morfología del defecto planar. En el detalle C se observa escoria atrapada, a partir de la cual, el defecto propaga hacia el interior y hacia el exterior del ducto. Hacia el interior, el defecto propaga debido a las tensiones generadas por la reparación de la soldadura a través de la ZAC de grano grueso, en coincidencia con lo observado en la probeta P30 (Fig. 18). Hacia la superficie exterior, el defecto se arresta al alcanzar la zona de grano fino recristalizado correspondiente a la primera pasada de soldadura (externa).

Contiguo a las probetas metalográficas se realizaron aperturas criogénicas. En la Fig. 20 se observa una fractografía y un análisis por microscopía electrónica de barrido de la probeta P29, próxima a la P30. Esta probeta no contenía defectos abiertos a la superficie. Se detectó falta de fusión en el interior de la soldadura: una zona oxidada central (recuadro amarillo) rodeada por superficies frágiles con planos de clivaje, correspondientes a la apertura criogénica (recuadro rojo). La falta de fusión puede haber sido provocada por escoria atrapada, que se desprendió durante la fractura de la probeta. No se observa propagación en servicio.

En la Fig. 20 también se observaron una especie de gotas (detalle A), sobre las que se realizó un análisis químico semicuantitativo por EDS. Se observa que corresponden también a material con falta de fusión.

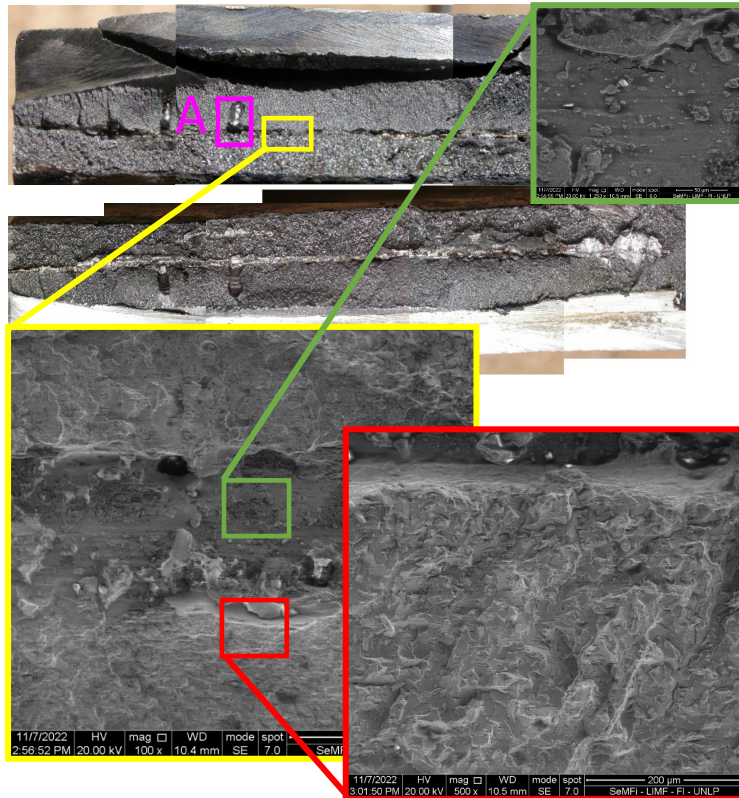


Fig. 20: Caño 124200. Apertura criogénica P29, contigua a probeta P30 (defecto A).

En la Fig. 22 se observa la superficie interna en la zona del defecto B. Se observa un defecto de fabricación, caracterizable como una socavadura atípica y excesiva.

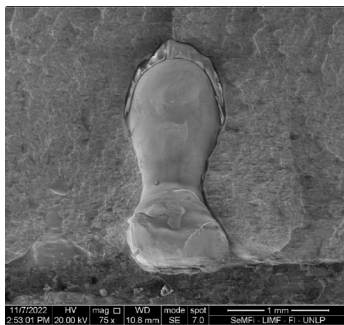


Fig. 21: Gota correspondiente a referencia "A" en la Fig. 14.



Fig. 22: Superficie interna defecto B. Zona de apertura criogénica P31. Se observan defectos en el talón de soldadura.

La superficie de fractura luego de la apertura criogénica de la probeta P31, (defecto B), muestra la presencia de una fisura desde la superficie interior de más de 3 mm de profundidad. La propagación dúctil que ocurrió durante la apertura criogénica en laboratorio demuestra la alta tenacidad en esta región (grano fino recrystallizado, según lo observado en la probeta metalográfica), lo que explica el arresto de la fisura en este punto.

Se concluye que el defecto B inició en una falta de fusión interior generada por escoria atrapada que luego propagó hacia adentro y hacia afuera. Los mecanismos potencialmente responsables de la propagación hacia el interior son dos: fisuración en frío o propagación por tensiones de la soldadura, las cuales son muy superiores en una reparación con la geometría observada que las

habituales. Ambos están relacionados con la fabricación. Si bien no se encontraron indicios de propagación en servicio, debido a las grandes dimensiones del defecto y a la severidad de la punta de la fisura, no se descarta la posibilidad de propagación futura de defectos como este en caso de combinarse con otros mecanismos de daño, como fatiga, lo cual dependerá de las condiciones operativas locales a las que estuviera expuesta la fisura.

Defecto F* (P42)

Se adicionó una probeta metalográfica en el extremo de la zona reportada con indicaciones, a mitad del caño. En la Fig. 23 se observa en la placa radiográfica una indicación longitudinal continua sobre el talón de una de las costuras, indicaciones alargadas transversales y desalineación de cordones. En la Fig. 24, se muestran las dos caras de la probeta metalográfica. Se observa un defecto planar interno en una soldadura reparada. Nótese las similitudes con los defectos D y B hallados en el caño 117720.

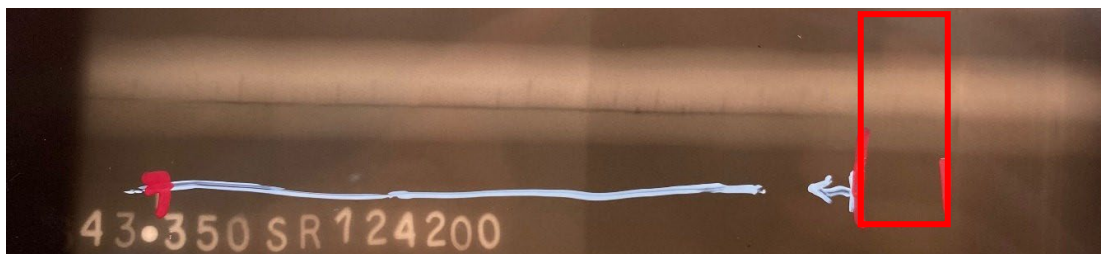


Fig. 23: Placa radiográfica de la soldadura de referencia 124200.

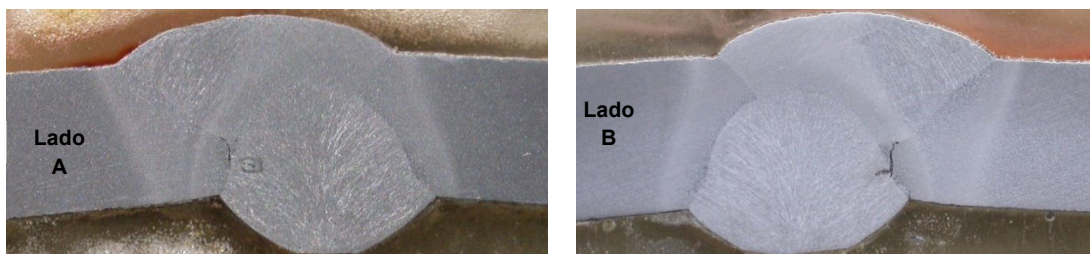


Fig. 24. Caño 124200. Defecto F*. Probetas metalográficas P42.

- d) Gasoducto Libertador General San Martín, Tramo Bosque Petrificado – Pico Truncado, Caño 51320

Defecto 1

Este defecto fue reportado inicialmente por la herramienta EMAT y confirmado mediante UTPA y placas gammagráficas. Fue retirado y enviado a laboratorio. Mediante inspección visual sobre el lado interno se detectó una socavadura de 35 mm de largo aproximadamente. Se realizó una probeta para su análisis metalográfico. En primer lugar, se pudo identificar más de una pasada de soldadura, evidenciando una reparación, con una última pasada, de gran aporte, del lado interno. Por otro lado, se midió la sobremonta interna resultando de 4,5 mm aproximadamente. En la probeta se observaron dos defectos tipo socavaduras originados por esta reparación defectuosa de

2,2 y 0,75 mm de profundidad (Fig. 25). A su vez, no se identificaron fisuras ni otro defecto en la probeta.

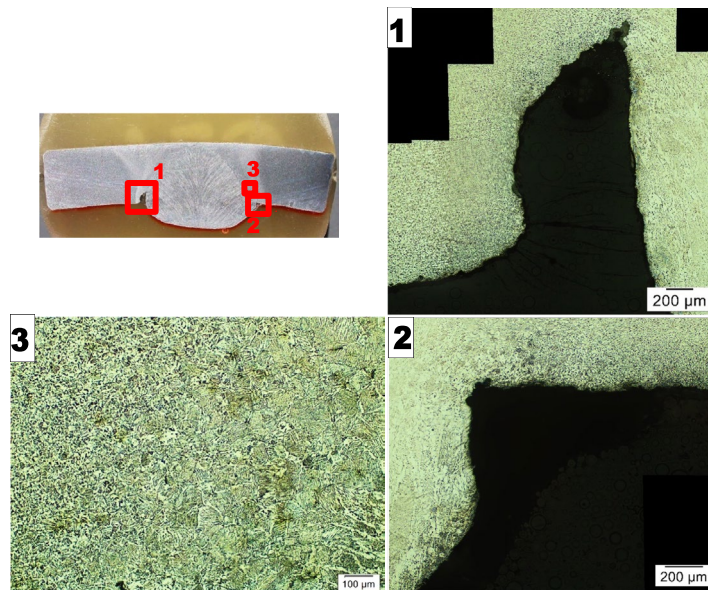


Fig. 25. Caño 51320, Defecto 1.

e) Gasoducto Neuba II, Tramo Altavista-Saturno, Caño 6380

Defecto 1

Visualmente, desde el lado externo del caño, se detecta una reparación realizada con electrodo revestido sobre la soldadura longitudinal.

En la probeta metalográfica se observa un defecto situado al lado de la sobremonta de la soldadura del lado interno de 0,26 mm de profundidad, en el talón interno de la soldadura (Fig. 26) y se observa que la soldadura del lado externo está compuesta por dos pasadas. No se observan signos de propagación en servicio. Los cordones de soldadura presentan una desalineación entre sí de 1,54 mm, la sobremonta interior es de 4,63 mm y la exterior de 1,37 mm. La soldadura del lado interno se encuentra volcada hacia el talón que presenta la fisura.

Aquí hay un mecanismo doble de formación del defecto. Por un lado, hay evidencia de falta de fusión, pero también se aprecia material de aporte en ambos lados de la fisura, lo que indica fisuración en el material aportado. Esta fisuración en caliente fue favorecida por la contracción térmica durante el enfriamiento y un alto concentrador de tensiones debido a una pobre geometría en el talón del cordón de raíz en esa zona.

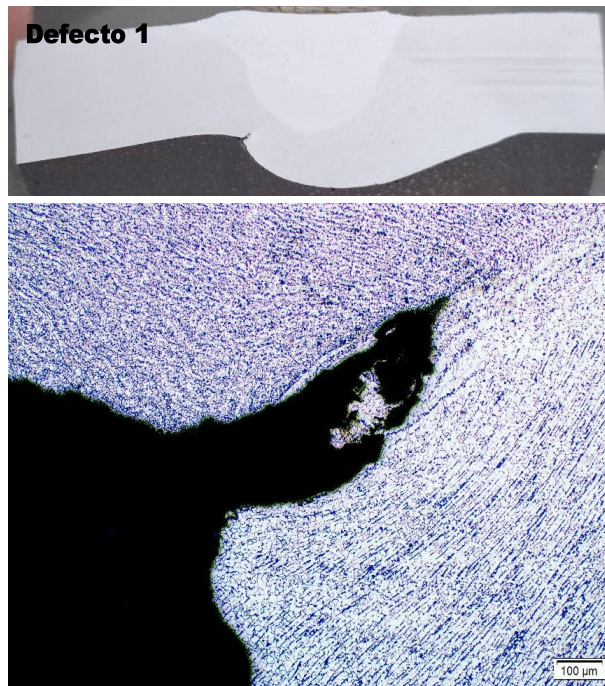


Fig. 26. Probeta metalográfica de corte circunferencial sobre defecto 4. Microscopía óptica 100x. Nital 2 %.

Es de destacar que este defecto resultó ser una pequeña fisura ubicada en una gran discontinuidad geométrica en el talón de una soldadura. Esto hizo que tanto el ILI como los END lo dimensionaran como un defecto mucho más grande (mayor a 5 mm cuando el defecto era del orden de 0,3 mm). El defecto era apto pero, por su geometría, no fue posible dimensionarlo adecuadamente en campo.

f) Gasoducto Libertador General San Martín, Tramo Cerri-La Sortija

Caño 66850

De este caño se evaluaron dos muestras:

La primera contenía un defecto que se encontraba ubicado en el enganche de la costura longitudinal interior y resultó ser una especie de poro de grandes dimensiones que contenía una pequeña fisura en su interior que se arrestaba al llegar a la zona grano fino de la ZAC. Además, se detectaron gran cantidad de inclusiones y dos pequeñas fisuras aledañas al defecto principal, dentro del botón de soldadura, que corresponden a un defecto típico de fabricación. La propagación en servicio de todas estas fisuras se consideró improbable.

La segunda muestra contenía un defecto pasante. Se efectuaron dos probetas: una correspondiente a un corte circunferencial para análisis metalográfico y otra, contigua a ésta en donde se efectuó una apertura criogénica.

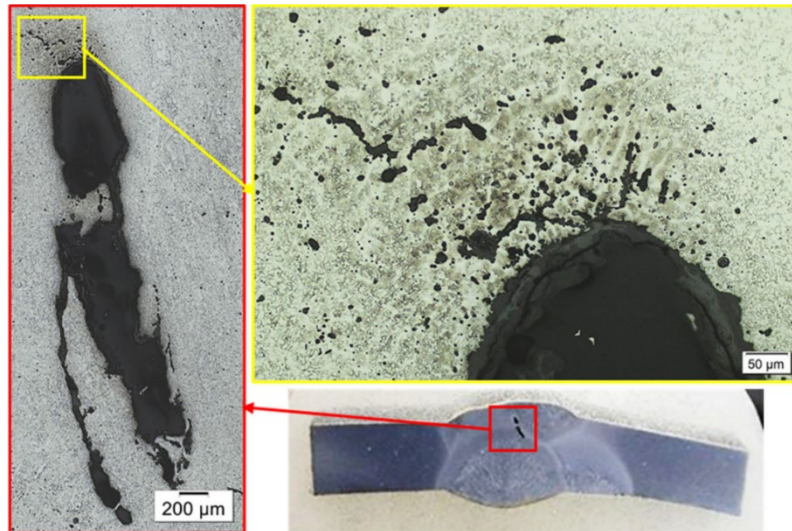


Fig. 27. Caño 66850. Defecto 2. Corte circunferencial - escoria atrapada. Microscopio óptico. Nital 2%

La microestructura resultó ser de grano fino ferrítica-perlítica típica un acero al carbono API 5L grado X52. En el corte circunferencial se identifican dos pasadas de soldadura en la cara interna del ducto, siendo la última de reparación. La secuencia de soldadura fue exterior-interior. Sobre el cordón exterior se observó escoria atrapada aproximadamente en el centro de la soldadura, de 3,21 mm de largo aproximadamente (Fig. 27).

El poro era de 3,5 mm de profundidad, es decir, un 40 % del espesor. Al combinarse con la escoria atrapada, la profundidad del defecto total era de, al menos, un 90 % del espesor, siendo necesaria una ínfima propagación en servicio para la generación de la fuga. Se examinó el borde exterior de la superficie de fractura y los extremos del poro mediante un microscopio electrónico de barrido SEM; si bien el estado de la superficie no arrojó resultados concluyentes, hay indicios de propagación por fatiga (Fig. 28).

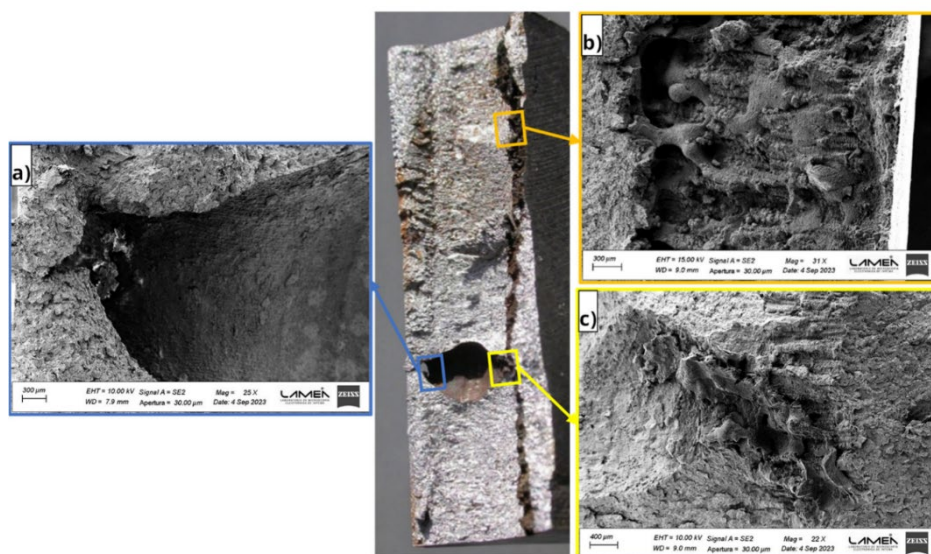


Fig. 28. Caño 66850. Apertura criogénica del defecto pasante 2.

- **Conclusiones**

Uno de los resultados más relevantes que se obtuvieron luego de haber analizado 37 muestras conteniendo defectos en soldadura longitudinal y, de los cuales se presentan algunos casos en este trabajo, es la evidencia consistente de estabilidad en servicio observada en una proporción significativa de los defectos longitudinales analizados. En numerosos casos, las aperturas criogénicas y los estudios fractográficos revelaron la presencia de productos de corrosión antiguos en las superficies de fisura, indicativos de propagación inicial ocurrida durante la fabricación o etapas tempranas de vida del ducto, seguida de un arresto efectivo y por consiguiente su estabilidad en el tiempo. Este comportamiento fue particularmente frecuente en defectos de fisuración en caliente y de laminaciones, donde la propagación se vio limitada por cambios locales en la microestructura y por zonas de mayor tenacidad. Incluso en defectos de longitudes considerables, no se observó evidencia de crecimiento sostenido en servicio.

Ahora bien, aunque la estabilidad fue el comportamiento dominante, se identificaron casos puntuales de defectos pasantes y fugas. En estos escenarios, el análisis post-mortem mostró que los defectos originales presentaban una severidad extrema, con profundidades efectivas cercanas al espesor total del caño y combinaciones geométricas particularmente desfavorables. En estos casos, la propagación requerida en servicio para alcanzar la falla fue mínima, lo que sugiere que la condición crítica estaba presente desde el origen del defecto.

Estos resultados refuerzan la necesidad de discriminar entre defectos inestables en el tiempo o con potencial de crecimiento en servicio y aquellas discontinuidades que, aun siendo detectables por ILI, no representan una amenaza para la integridad del ducto. Haciendo uso de la experiencia y de los conocimientos aportados por estos estudios y análisis de laboratorios se plantea la necesidad de:

- Implementar campañas de corridas ILI con herramientas aptas para detectar indicaciones lineales en sentido axial presentes en las soldaduras longitudinales, tales como TFI, EMAT, Ultrasonido u otras tecnologías apropiadas.
- Inspeccionar y evaluar en campo la extensión total de aquellas soldaduras que contengan indicaciones no admisibles reportadas por ILI, haciendo uso de técnicas de END adecuadas y complementarias entre sí, tal como Partículas Magnetizables, Ultrasonido Angular y Gammagrafía/Radiografía.
- En obras de Recobertura de gasoductos, no limitarse sólo a la caracterización de defectos volumétricos sino también a inspeccionar visualmente, en primera instancia, las soldaduras; en caso de encontrar alguna anomalía, complementarla con Partículas Magnetizables. Si el resultado es positivo implementar Ultrasonido Angular y Gammagrafía antes de definir la acción a tomar.
- Identificar en la traza de los ductos zonas propensas a inducir tensiones sobre la cañería (arcillas expansivas, movimientos telúricos, aluviones, entre otros), los que podrían generar la activación y crecimiento de defectos que inicialmente eran estables.
- Mantener un feedback constante con el proveedor de servicios ILI, compartiéndole los resultados de los ensayos no destructivos realizados en campo y los hallazgos surgidos de estudios y análisis de laboratorio cuando corresponda.
- Contar con una biblioteca con información propia de los ductos, que permita la toma de decisiones basada en conocimientos propios y no sólo lo informado por bibliografía, desde historial de eventos, resultados de ensayos mecánicos, análisis químicos, rotura criogénica de muestras, END, corridas ILI, etc.

En resumen, los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que a priori, con el sólo dato de una corrida ILI, no basta para lograr un conocimiento acabado de la naturaleza de los defectos reportados en soldaduras longitudinales. Esta falta de certeza apoya el empleo actual en la industria de criterios conservadores para su análisis lo que deriva en una gran cantidad de excavaciones y reparaciones con impacto directo en costos operativos y disponibilidad del sistema. De aquí radica la importancia de sumar a los conocimientos académicos el que proviene de la recopilación e integración de datos propios del sistema de ductos. Estos datos generados internamente nacen de verificaciones en campo, análisis de muestras, implementación de campañas de corridas ILI entre otras acciones, lo que facilitará la toma de decisiones antes de realizar una excavación basadas en fundamentos más sólidos.

- **Bibliografía**

API Specification 5L – Specification for Line Pipe

API 579-1/ASME FFS-1 – Fitness-For-Service

API RP 1176 – Assessment and Management of Cracking in Pipelines

Limón, A. (2022). Evaluación de fisuras y defectos planos en la soldadura longitudinal.

Pang et al. (2014). Relations between fatigue strength and other mechanical properties of metallic materials.

API Recommended Practice 579: Fitness for service. 1st ed. American Petroleum Institute; January 2000.

Otegui JL, Chapetti MD, Motylicki J. Fatigue assessment of an E.R.W. oil pipeline. Int J Fatig 2002; 24:21–8. ISSN0142-1123.

- **Currículum Vitae abreviado**

Título y lugar de estudio:

Ingeniero Mecánico – Universidad Tecnológica Nacional, F.R.L.P.

Especialista en Gas Natural – Instituto del Gas y del Petróleo, Facultad de Ingeniería, U.B.A.

Trayectoria:

2016 – Actualidad: Transportadora de Gas del Sur S.A.

2011 – 2016: CTI Solari & Asociados S.R.L.

Cargo actual en la empresa: Ingeniero de Integridad