

ANÁLISIS DE DEFECTO DE ANOMALÍA GEOMÉTRICA TIPO ABOLLADURA HELICOIDAL EN UNA CAÑERÍA DE GAS Y SU REHABILITACIÓN MEDIANTE MATERIALES COMPUESTOS

Autor: Alan Cornejo - Emanuel Benitez - Matias Vigliano - Santiago Parodi

Empresa: Transportadora de Gas del Norte S.A. (TGN)

Email: alan.cornejo@tgn.com.ar , emanuel.benitez@tgn.com.ar , matias.vigliano@tgn.com.ar , santiago.parodi@tgn.com.ar

SINOPSIS

Durante el proceso de verificación en campo de anomalías geométricas realizadas en el Sistema Centro Oeste de TGN, se identificó un defecto complejo de tipo laminación helicoidal, caracterizado por una deformación en forma de ampolla de 1600 mm de largo, 390 mm de ancho y una protuberancia máxima de 22 mm. El ducto, construido con cañería API 5L X60 del año 1982 con espesor nominal de 8,74 mm, presentó una pérdida de espesor interna de hasta 51%, con valores mínimos de 4.5 mm en la zona afectada.

La evaluación de aptitud para el servicio (FFS) se realizó conforme a la norma API 579 – Parte 13, según evaluación nivel 3 con modelado por elementos finitos (FEM). Se desarrollaron modelos elasto-plásticos y de carga límite para determinar las presiones de falla. Los resultados indicaron una presión de colapso global con un factor de seguridad menor a 1,25 veces la MAPO, no aceptable según los criterios de seguridad definidos por TGN. La similitud entre las deformaciones simuladas y las observadas en campo validó el modelo. La hipótesis de ataque por hidrógeno fue descartada por la baja presencia de potencial electroquímico en la zona, y se asumió que el defecto no presenta crecimiento activo.

Para mitigar el defecto, se implementó una reparación con material compuesto siguiendo la norma ASME PCC-2-2022, cuyo procedimiento incluyó la preparación superficial mediante arenado y control de rugosidad, la aplicación de material de relleno para transferencia de carga, el encintado circunferencial con 10 capas de cinta de kevlar, el control de condiciones ambientales y verificación de dureza.

El diseño del refuerzo consideró esfuerzos circunferenciales y axiales. La reparación garantiza una vida útil estimada de 20 años, restableciendo la integridad estructural y permitiendo la operación segura del ducto.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de integridad en ductos de transporte de alta presión enfrenta desafíos significativos cuando se detectan anomalías que no se ajustan a las geometrías de defecto estándar (como corrosión simple o abolladuras mecánicas puras). En el caso del Tramo 32 del gasoducto "La Carlota" (Sistema 30"), operado por TGN, las inspecciones de campo revelaron una anomalía singular que combinaba pérdida de material y deformación geométrica asociada al proceso de fabricación de la tubería (costura helicoidal).

El ducto opera a una presión de 69,68 [kg/cm²]. El defecto identificado fue caracterizado como una laminación que, debido a la falta de hermeticidad en su cara interna (fisura o defecto pasante interno), permitió el ingreso de gas a presión en el intersticio laminar. Esto provocó la separación de las capas del acero y la consecuente deformación plástica hacia el exterior, formando una "ampolla" visible sobre el lomo de la cañería.

Debido a que los métodos de evaluación convencionales (API 579 Nivel 1 y 2) son conservadores o inaplicables para geometrías tan complejas, fue necesario recurrir a una evaluación de Nivel 3. Este enfoque emplea análisis numérico avanzado para simular el comportamiento tensional real del componente. El objetivo de este artículo es documentar técnicamente todo el ciclo de gestión de esta amenaza: desde su caracterización y modelado computacional hasta la ingeniería y ejecución de su reparación definitiva mediante tecnología de materiales compuestos.

DESARROLLO

El presente trabajo detalla el análisis de integridad y la posterior rehabilitación de un defecto complejo detectado en un tramo de gasoducto correspondiente al sistema de Transportadora de Gas del Norte S.A. La anomalía consistió en una laminación helicoidal que evolucionó en una deformación geométrica tipo ampolla (*blister*) cuyas dimensiones fueron de 1600 mm de longitud axial, 390 mm de ancho circunferencial y una protuberancia radial máxima de 22 mm. La cañería de 30" afectada se corresponde a un material API 5L X60 y espesor nominal de 9,1 mm, la cual presentó una reducción de espesor remanente crítica con valores mínimos de 4,5 mm.



Imagen 1: verificación de anomalía en campo

La presente anomalía fue detectada mediante el pasaje de la herramienta de inspección interna de tipo Magnetic Flux Leakage (MFL) y Caliper realizada en el año 2022. En el reporte asociado se detectaron 2 (dos) anomalías de tipo geométricas en un mismo caño y muy cercanas entre si interactuantes con defectos volumétricos de corrosión.

Dada la criticidad de la anomalía detectada, se procedió a realizar una evaluación retrospectiva de los registros históricos. Mediante un análisis comparativo de corridas (Run-to-Run comparison), se logró correlacionar la indicación actual con los datos obtenidos en la campaña de Inspección Interna (ILI) de 2017. Si bien la característica ya estaba presente en el reporte anterior, el cotejo de las señales y la revisión dimensional evidenciaron una evolución significativa en la morfología del defecto en el último reporte

En la *Figura 1: dispersión de anomalías, reporte 2017* y *Figura 2: dispersión de anomalías, reporte 2022* se muestra la distribución de las anomalías a lo largo de la cañería y la variación que hubo entre la inspección interna realizada en 2017 y la 2022.

En 2017 se reportó en el informe 1 (una) anomalía geométrica cuya profundidad reportada fue de 1% con 11 (once) anomalías volumétricas en cercanías, el mayor porcentaje de pérdida de espesor fue del 27%.

COMMENTS, Dist. a soldadura [m] y Posición angular [horas]

COMMENTS ● AGRUPACION / indic. adic. ● anom.de DI-abolladura con pérdida de ... ● pérdida de metal-anom.de ma... ● pérdida de metal-corr...

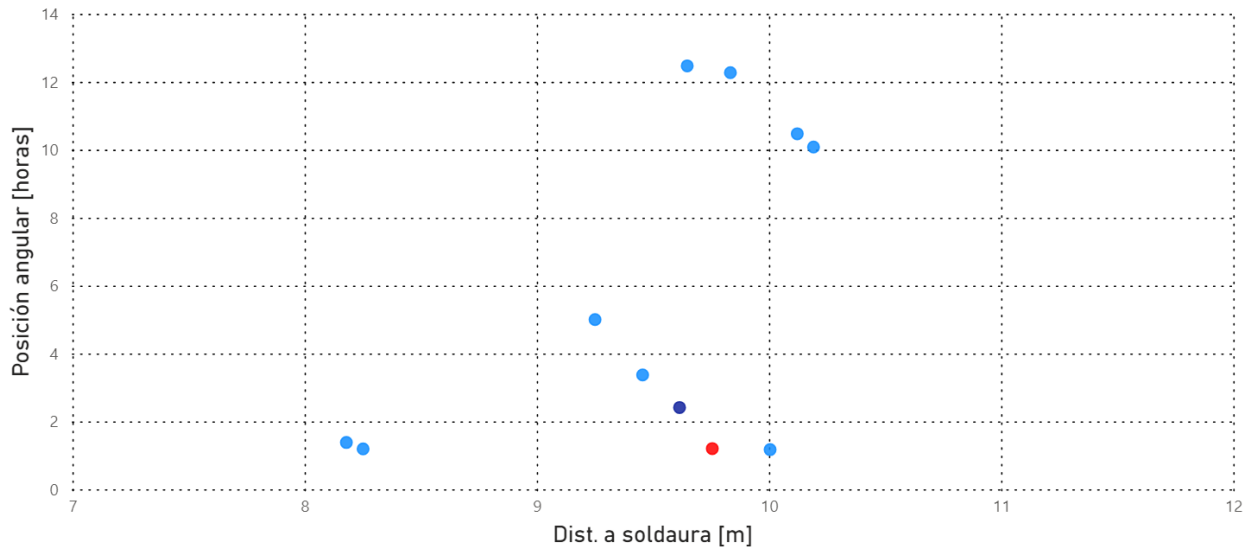


Figura 1: dispersión de anomalías, reporte 2017

Mientras que en el 2022 se informaron 2 (dos) anomalías geométricas complejas de 1,1% y 1,4% de profundidad con 32 (treinta y dos) anomalías volumétricas en cercanías, el mayor porcentaje de pérdida de espesor reportado fue del 31%.

En la gráfica se puede apreciar que las anomalías volumétricas siguen una dirección en el sentido helicoidal del ducto

identificación de evento, Dist. a soldadura [m] y Posición angular [horas]

identificación de evento ● Abolladura compleja ● Agrupación de corrosión ● Corrosión ● Grupo de corrosión

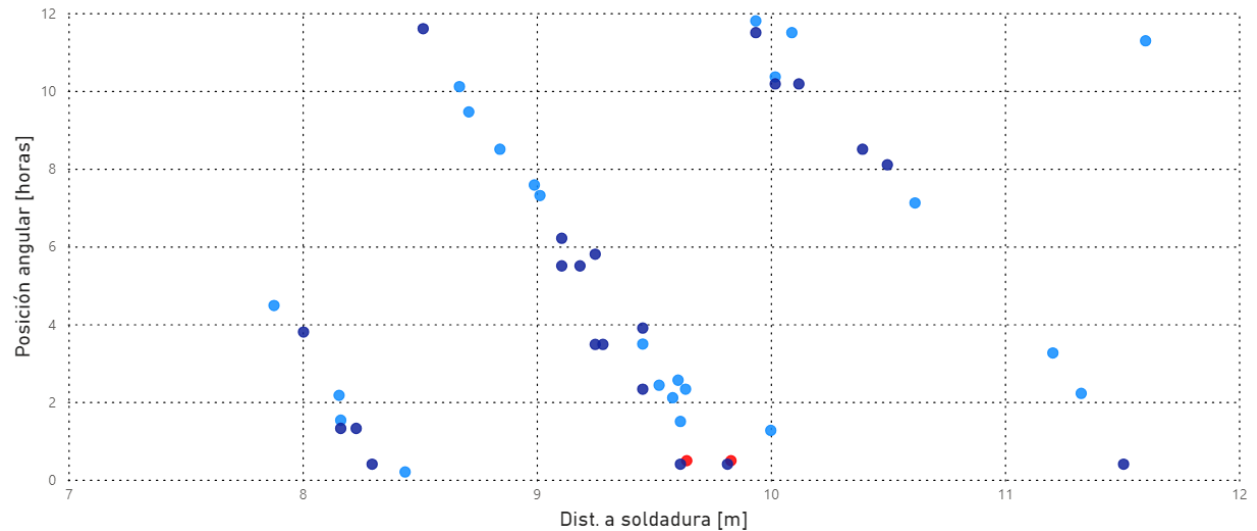


Figura 2: dispersión de anomalías, reporte 2022

Para la determinación de la aptitud para el servicio (Fitness-for-Service) y la caracterización morfológica detallada de la anomalía, se ejecutó una campaña de inspección in situ mediante Ensayos No Destructivos (END). La metodología empleada consistió en una inspección integral que combinó ultrasonido de arreglo de fases (PAUT): para el mapeo volumétrico y la detección de discontinuidades subsuperficiales, ultrasonido convencional (UT-Scan A): para la validación puntual de espesores remanentes, relevamiento dimensional de precisión: mediante el uso de puentes de medición o escaneo láser para cuantificar la distorsión geométrica y ensayos complementarios de gammagrafía para la evaluación de la sanidad de la costura de soldadura adyacente y la detección de posibles fisuras asociadas a la deformación.

Se detectó que la anomalía presenta una configuración helicoidal, alineada paralelamente a la costura de soldadura (ángulo de 60°). Sus dimensiones alcanzan una extensión longitudinal de 1600 mm y un ancho de arco de 390 mm.

Al momento de realizar la inspección visual se detectó distorsión geométrica y se registró una deformación radial expansiva (abolladura hacia el exterior o bulging) con un pico máximo de 22 mm en el epicentro del defecto, alterando significativamente la circularidad local del ducto.

Las mediciones ultrasónicas confirmaron una severa pérdida de material en la zona de la deformación. El espesor remanente (trem) oscila entre 4,5 mm y 5,3 mm, lo que se traduce en una pérdida de pared local de hasta el 51% respecto al espesor nominal.

La ubicación relativa del defecto introduce factores críticos para el análisis de concentración de tensiones, situándose a escasos 400 mm de las costuras helicoidales y a 140 mm de una junta circunferencial, comprometiendo potencialmente las Zonas Afectadas por el Calor (ZAC).



Imagen 2: batería de END realizados en campo.

Se descartó la hipótesis de daño por hidrógeno (HIC/SOHIC) debido al bajo potencial de protección catódica registrado históricamente en la zona y la ausencia de condiciones químicas promotoras, concluyéndose que la presurización de la laminación es puramente mecánica.

La definición de la estrategia de rehabilitación para el defecto detectado se vio fuertemente condicionada por una combinación de restricciones operativas y geométricas. En primer lugar, desde el punto de vista de la infraestructura, el tramo afectado carece de redundancia (loop o ducto paralelo); esta tipología de red impide realizar maniobras de desvío de flujo (bypass) para aislar la zona crítica sin interrumpir el suministro, limitando severamente la ventana operativa para cualquier intervención.



Figura 3: ubicación del defecto dentro del sistema de TGN.

En cuanto a la factibilidad técnica de una reparación definitiva mediante la instalación de refuerzo de unión recta, el análisis detallado de la morfología del defecto desaconseja esta opción. Esto se debe a que la anomalía presenta una deformación geométrica de carácter helicoidal, lo cual genera dos problemas críticos para la integridad de la reparación:

- **Dificultad de ajuste (no gap):** La irregularidad superficial impide un contacto estrecho entre la pared interna del refuerzo y el metal base, comprometiendo la transferencia efectiva de los esfuerzos circunferenciales (hoop stress) y permitiendo el ingreso de humedad por debajo del refuerzo.
- **Material de relleno:** Para compensar la deformación, se requeriría un volumen excesivo de material de relleno (filler epóxico) en el espacio anular. Esto, sumado a la necesidad de fabricar una envoltura de longitud atípica (superior a los 2 metros), introduce complejidades constructivas y riesgos de soldadura que exceden los estándares de seguridad aceptables para una reparación en servicio.

Finalmente, se evaluó la alternativa de eliminación del defecto mediante corte y reemplazo de cañería. Sin embargo, esta opción fue descartada debido a la alta demanda del sistema. La magnitud de los consumos actuales hace inviable la implementación de un sistema de abastecimiento alternativo que pueda sostener la presión y el caudal requeridos durante el tiempo que demandaría la maniobra de venteo y recambio

Por lo antes indicados y debido a la complejidad del defecto se debieron buscar alternativas.

En primer lugar, se realizó una evaluación de Aptitud para el Servicio (FFS) de Nivel 3 según la norma API 579-1 / ASME FFS-1 Parte 13 mediante modelos de elementos finitos (FEM) elasto-plásticos y de carga límite utilizando. Se evaluaron 3 criterios para la determinación de la presión de falla:

1. Protección contra el Colapso Plástico Global (Análisis de Carga Límite): Este criterio evalúa la estabilidad estructural bajo un modelo de plasticidad perfecta. Se utilizó un modelo constitutivo elasto-plástico ideal (sin endurecimiento por deformación), donde la tensión de fluencia de cálculo (S_y) se estableció como el valor mínimo entre $1.5S$ (basado en la tensión admisible de ASME B31.8) y el límite de fluencia nominal ($S_y \text{ nom}$) de 415 MPa para el acero API 5L X60
2. Protección contra el Colapso Plástico (Análisis Elasto-Plástico): A diferencia del análisis de carga límite, este enfoque integra la curva tensión-deformación verdadera del material y considera las no linealidades geométricas (grandes deformaciones y desplazamientos)
3. Criterio de Falla Local (Strain Limit): Se verificó la deformación plástica local máxima admisible según ASME VIII Div. 2, Parte 5. Se calculó el límite de deformación triaxial ϵ_L en función del estado tensional, obteniéndose un valor límite de 33,5%. Considerando la deformación previa por conformado en frío $\epsilon_{cf} = 1,2\%$, el límite admisible para la simulación resultó en $\epsilon_{peq} < 32,2\%$.

Para determinar la condición operativa del ducto, la presión de falla calculada debe ser afectada por factores de seguridad (FS) que garanticen un margen de confiabilidad adecuado frente a la incertidumbre y la criticidad del defecto. Tras el análisis mediante elementos finitos, se adoptó de manera conservadora una presión de falla última de 81 kg/cm². Esta decisión técnica se fundamenta en que el colapso plástico global (inestabilidad estructural generalizada) se manifestó antes de que se alcanzara el límite de deformación plástica local (32,2 %) en la zona de la laminación. Para determinar la presión admisible fue necesario aplicar un factor de seguridad de 1,25 sobre la presión de falla antes calculada arrojando así un resultado de 64,8 kg/cm².

Al contrastar los valores admisibles calculados con la Presión de Operación real de 69,68 kg/cm², se observa que la presión de falla calculada excede los límites de operación ($P_{op} > P_{adm}$). Debido a que no se satisfacen los márgenes de seguridad requeridos para garantizar la contención de presión, el defecto se declara No Apto para el Servicio.

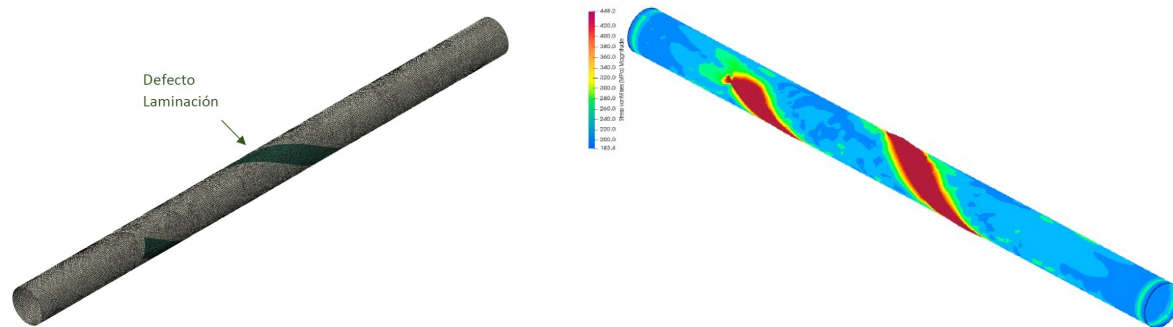


Figura 4: modelado en software de elementos finitos.

Para la reparación definitiva se seleccionó un sistema de refuerzo no metálico, diseñado bajo el estándar ASME PCC-2-2022 "Repair of Pressure Equipment and Piping", Artículo 4.1. Esta tecnología permite restituir la capacidad de carga del tubo mediante la transferencia de esfuerzos circunferenciales hacia una "camisa" de material compuesto.

Se seleccionó un sistema de reparación basado en materiales compuestos de alta performance, compuesto por una resina epoxi de dos componentes, un relleno estructural diseñado para la transferencia de cargas y una cinta de refuerzo de fibra de aramida. El dimensionamiento del refuerzo se basó en el cálculo del espesor mínimo de laminado (t_{min}) requerido para mitigar tanto las tensiones circunferenciales como las axiales, siguiendo los lineamientos de las ecuaciones de diseño de la normativa de referencia. El análisis determinó un espesor crítico de 7,2 mm. Tomando como base un espesor nominal por capa de 0,89 mm, el cálculo teórico estableció la necesidad de 8 capas de refuerzo; no obstante, con el fin de incrementar los márgenes de seguridad y confiabilidad de la reparación, se definió una configuración final de 10 capas. En cuanto a la extensión longitudinal de la intervención, se consideró no solo la longitud física del defecto de 1600 mm, sino también la necesidad de garantizar una zona de transición adecuada para la transferencia efectiva de esfuerzos hacia el metal base. En consecuencia, se definió una longitud total de reparación de 4000 mm, asegurando una cobertura integral y un solape suficiente en los extremos del área afectada

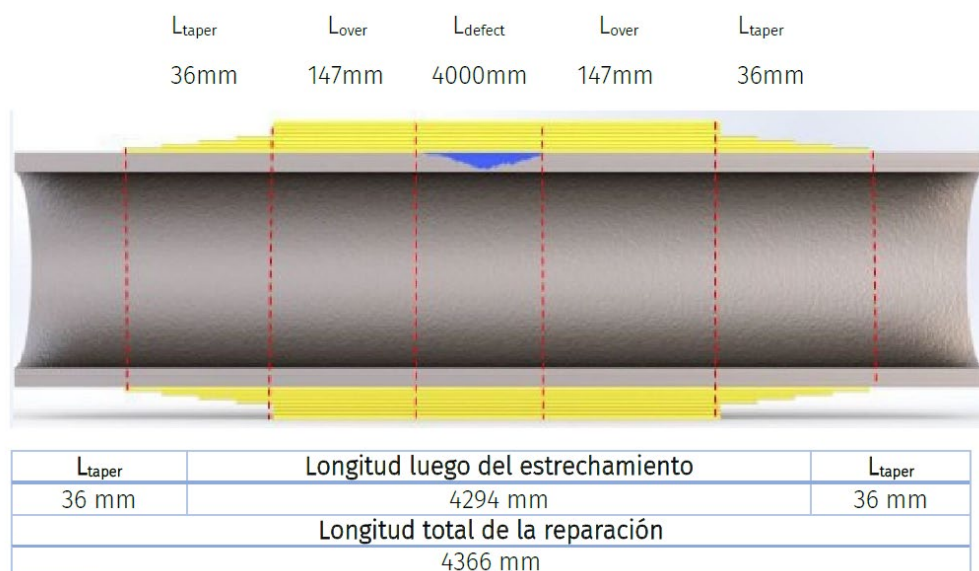


Figura 5: esquema de colocación de material compuesto

La fase de ejecución inició con la preparación de la superficie metálica mediante arenado abrasivo en una extensión de 5 metros, verificando un perfil de anclaje promedio de 73,55 μm , valor que superó el umbral mínimo de diseño de 60 μm requerido para maximizar la adherencia mecánica. Previo a la aplicación, se registró una humedad relativa del 50,01% y una temperatura ambiente de 31,2°C, garantizando la ausencia de condensación sobre el sustrato. La implementación comenzó con la regularización geométrica mediante la aplicación de relleno estructural sobre la ampolla y las zonas irregulares para asegurar una transferencia de carga uniforme y eliminar vacíos.



Imagen 3: ubicación de zona de reparación – limpieza superficial

Posteriormente, se procedió con la imprimación epoxídica y el encintado circunferencial de las 10 capas de refuerzo. Durante este proceso, una interrupción por lluvia obligó a proteger la zona y re-verificar las condiciones de humedad (67,17%) antes de continuar, asegurando la integridad del curado. Finalmente, se validó la correcta polimerización mediante ensayos de dureza Shore D sobre muestras testigo, donde el relleno estructural alcanzó una dureza de 92 (criterio >77) y la resina del laminado un valor de 83 (criterio >74), confirmando la consolidación del sistema y su capacidad para soportar las cargas de diseño del gasoducto.



Imagen 4: verificación de parámetros ambientales



Imagen 5: proceso de colocación de filler y encintado

Número de lote (Parte A, Parte B)	Producto	Dureza (Shore D)			Resultado	Valor de aceptación	Conformidad
12-240619-1 13-240618-1	F3X8	91	93	92	92	>77	Si
23-240617-1 24-240618-1	R3X95	84	83	82	83	>74	Si

Tabla 2. Resultados de las mediciones de dureza de las muestras.



Imagen 6: control de calidad de muestras extraídas

3. CONCLUSIONES

El estudio detallado de la anomalía permitió arribar a las siguientes conclusiones técnicas:

La implementación de metodologías de evaluación de Aptitud para el Servicio (FFS) Nivel 3, basadas en análisis de elementos finitos (FEM), resulta fundamental para la gestión de defectos complejos que exceden los criterios de evaluación simplificados de las normas de diseño. En este caso, la simulación elasto-plástica permitió determinar que, ante una pérdida de pared del 51%, la presión de falla se redujo a 81.0 kg/cm^2 . Este enfoque permite una toma de decisiones informada sobre la operabilidad de activos críticos, validando intervenciones inmediatas cuando la presión operativa (69.68 kg/cm^2) supera los límites de seguridad calculados (64.80 kg/cm^2).+4La precisión en la caracterización morfológica del daño mediante Ensayos No Destructivos (END) avanzados, como el ultrasonido multielemento (PAUT), permite diferenciar entre defectos de fabricación estables y mecanismos de daño evolutivos. La concordancia entre la morfología observada en campo y la reproducida numéricamente permitió confirmar una laminación de fabricación presurizada, descartando procesos de degradación por hidrógeno debido al bajo potencial electroquímico del entorno. Esta distinción es vital para la industria, ya que optimiza los recursos de mitigación al evitar tratamientos químicos innecesarios y centrar los esfuerzos en el refuerzo estructural.+4Los sistemas de reparación mediante materiales compuestos (aramida/epoxi), diseñados bajo estándares internacionales como ASME PCC-2, se consolidan como una alternativa técnica y económicamente superior a los métodos tradicionales de sustitución de tramos. La capacidad de estos sistemas para conformarse a geometrías irregulares (como ampollas de 22 mm de flecha) y compensar pérdidas de pared significativas permite rehabilitar el factor de seguridad original del ducto. Esta tecnología garantiza una vida útil prolongada, en este caso estimada en 20 años, sin requerir paradas de planta, cortes de tubería o reducciones permanentes en la capacidad de transporte del sistema.+4La integridad a largo plazo de los refuerzos no metálicos depende estrictamente del cumplimiento de los parámetros de aplicación, tales como el perfil de anclaje (mínimo $60 \text{ }\mu\text{m}$), el control de humedad relativa y la validación de la polimerización mediante ensayos de dureza Shore D. El éxito de esta campaña subraya la importancia de la supervisión técnica en campo para asegurar que el sistema trabaje solidariamente con el acero, eliminando vacíos mediante rellenos estructurales y garantizando la transferencia efectiva de cargas en zonas de transición crítica.

Bibliografía

[1] API 579-1 / ASME FFS-1, *Fitness-For-Service*, American Petroleum Institute / American Society of Mechanical Engineers, 2016. Part 13 "Assessment of Laminations".

[2] ASME PCC-2, *Repair of Pressure Equipment and Piping*, American Society of Mechanical Engineers, 2022.

[3] ASME B31.8, *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*.

[4] ASME VIII Div. 2, *Boiler and Pressure Vessel Code - Rules for Construction of Pressure Vessels*, Part 5 "Design by Analysis".

[5] ISO 24.817, *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Composite repairs for pipework*.

BREVE CV

Alan Cornejo

Ingeniero Mecánico, graduado de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN FRBA), con más de 11 años de experiencia en la industria del petróleo y gas. Desde 2015, me he dedicado a tareas relacionadas con la gestión de inspecciones internas, la definición de verificaciones en campo, el análisis de aptitud para el servicio y la implementación de medidas de mitigación.

Emmanuel Benitez

Ingeniero Electromecánico, graduado en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN FRP). Nivel 2 en Partículas Magnetizables y Nivel 2 en Líquidos Penetrantes, según IRAM-NM-ISO 9712. Ingreso a TGN en 2018 como Mecánico de Gasoductos. Desde 2022 a la actualidad se desempeña como Analista de Integridad en el Departamento de Integridad de TGN.

Matias Vigliano

Ingeniero en Materiales, graduado del Instituto Sabato (CNEA), con Maestría en Ingeniería Estructural Mecánica (UTN) y especialización en gestión. Cuento con cerca de 18 años de experiencia en los sectores nuclear y de transporte de gas. Desde 2008, me he dedicado a la tecnología de materiales, la inspección de componentes mecánicos y, actualmente, a la gestión de integridad de activos.

Santiago Parodi

Ingeniero en Materiales, graduado de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), con más de 8 años de experiencia en la industria del gas y petróleo. Desde 2017, me he dedicado a tareas de gestión de integridad de ductos, inspección basada en riesgo (RBI) y aptitud para el servicio y mitigación de defectos.