

DESEMPEÑO Y COMPARACIÓN DE DIFERENTES RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS INSTALADOS EN UN MISMO GASODUCTO (3LPE, FBE, CINTA PE): 30 AÑOS DESPUÉS

Marascio. E / Mancuso. G, Transportadora de Gas del Norte,
German.Mancuso@tgn.com.ar, Esteban.MARASCIO@tgn.com.ar

Sinopsis

La protección anticorrosiva de ductos enterrados constituye un aspecto crítico para la integridad estructural y la continuidad operativa de los sistemas de transporte de gas. En este trabajo se presenta un análisis comparativo del desempeño de tres recubrimientos externos aplicados en un mismo gasoducto a lo largo de tres décadas de operación: epoxi en polvo (FBE), cinta de polietileno (PE Tape) y polietileno tricapa (3LPE). La particularidad del caso radica en que todos los tramos analizados (del mismo ducto) se encuentran sometidos a condiciones similares de suelo y protección catódica, lo que permite evaluar de manera directa la efectividad relativa de cada esquema de recubrimiento.

La metodología integró múltiples fuentes de información: inspecciones internas (ILI) realizadas en 2016 y 2022, relevamientos de potencial a intervalo cercano (CIS), estudios de localización de fallas de recubrimiento mediante gradiente de potencial continuo (DCVG), y campañas de caracterización de suelos. Los parámetros estudiados incluyeron resistividad eléctrica, pH, humedad y granulometría. Para el procesamiento y correlación de datos se emplearon herramientas estadísticas y librerías especializadas de Python, aplicando un enfoque exploratorio y relacional.

El estudio permitió establecer un marco comparativo objetivo del desempeño de los distintos recubrimientos bajo condiciones similares de suelo y protección catódica. Se evaluaron variables críticas como la densidad y crecimiento temporal de defectos, su distribución axial respecto a soldaduras y uniones, y la localización circunferencial de daños vinculados a esfuerzos del suelo. Particular atención se dedicó al fenómeno de corrosión apantallada en sistemas 3LPE y mantas termo contraíbles, donde la pérdida de adherencia facilita la penetración de electrolito entre el recubrimiento y el acero, impidiendo la acción efectiva de la protección catódica y promoviendo procesos de corrosión.

Los resultados evidencian diferencias significativas en la durabilidad de los recubrimientos con la protección catódica. Mientras que los sistemas 3LPE presentan vulnerabilidades asociadas al apantallamiento, los recubrimientos FBE y PE Tape muestran un mejor comportamiento frente a defectos profundos y una mayor efectividad en la interacción con la protección catódica. Estos hallazgos permiten caracterizar las limitaciones inherentes a cada tecnología y comprender los mecanismos de degradación bajo condiciones reales de operación.

Introducción

Según el estándar AMPP SP0169, un revestimiento anticorrosivo se define como la barrera física destinada a aislar la superficie metálica del electrolito circundante, impidiendo la formación de celdas electroquímicas responsables de los procesos de corrosión. Esta función barrera no se limita al mero aislamiento eléctrico, sino que depende también de la adecuada compatibilidad química entre el revestimiento y el sustrato metálico, condición indispensable para garantizar una adherencia estable y de larga duración.

El estándar establece que la correcta selección del sistema de revestimiento y su apropiada aplicación constituyen factores críticos para asegurar el desempeño a largo plazo del sistema integral de protección contra la corrosión. Una selección inadecuada del material, así como deficiencias en la preparación superficial o en el proceso de aplicación, pueden derivar en fallas operativas y estructurales tales como pérdida de adherencia, daños mecánicos por impacto o abrasión, deterioro por manipulación indebida, esfuerzos inducidos por el terreno, fenómenos de apantallamiento de la protección catódica, envejecimiento prematuro del material y agrietamiento por tensión ambiental.

En consecuencia, la norma establece que un sistema de protección eficaz debe contemplar la acción complementaria de la protección catódica y un revestimiento compatible, durable y aplicado bajo estrictos controles de calidad, considerando las condiciones específicas del entorno de operación.

En el ámbito nacional, la normativa NAG 108 establece los requisitos mínimos aplicables a los revestimientos externos de cañerías de acero destinadas al transporte y distribución de gas natural. Su objetivo es asegurar que dichos sistemas proporcionen una protección efectiva frente a la corrosión externa, garantizando parámetros esenciales como adherencia, continuidad dieléctrica, resistencia mecánica y compatibilidad con los sistemas de protección catódica. Entre los principales esquemas de revestimiento actualmente aprobados se incluyen laminados plásticos, cintas de polietileno reforzadas, recubrimientos epoxi, cintas de petrolato, poliolefinas extruidas y materiales termocontraíbles.

Transportadora de Gas del Norte S.A. (TGN), operadora de una red superior a 11.000 kilómetros de gasoductos de transporte, cuenta con amplia experiencia en la operación y mantenimiento de diversos sistemas de revestimiento anticorrosivo, cada uno con características técnicas, ventajas y limitaciones particulares que deben ser evaluadas en función de las condiciones de servicio.

El presente trabajo se enfoca en una línea de transporte de gas natural cuya construcción original data de 1990 y que fue objeto de dos ampliaciones posteriores, ejecutadas en los años 2000 y 2009. En cada etapa constructiva se adoptaron distintos esquemas de revestimiento, seleccionados conforme a la tecnología disponible y al marco normativo vigente en cada período.

Desarrollo

Metodología de trabajo

El presente estudio tiene como finalidad desarrollar un análisis integral del desempeño de los sistemas de revestimiento externo aplicados a cañerías enterradas, mediante la integración sistemática de diversas fuentes de información obtenidas a partir de campañas de inspección en campo, estudios de caracterización de suelos y evaluaciones del sistema de protección catódica.

La cañería objeto de análisis posee una extensión total de 98,6 km y presenta, a lo largo de su trazado, distintos tipos de revestimientos aplicados en diferentes etapas de su vida operativa. Los

sistemas identificados son: epoxi adherido por fusión (FBE), cinta de polietileno (PE Tape) y polietileno tricapa (3LPE). La distribución espacial de estos revestimientos responde a los criterios constructivos y tecnológicos vigentes en cada período de intervención.

Esta configuración particular constituye un escenario técnicamente relevante, ya que permite efectuar un análisis comparativo del comportamiento de los distintos sistemas bajo condiciones de contorno sustancialmente equivalentes, tanto en términos de características del suelo como de desempeño del sistema de protección catódica.

La Tabla 1 presenta el detalle descriptivo de los segmentos considerados en el presente estudio.

Segmento	Año de construcción	Revestimiento	Diámetro (mm)	Longitud (km)
Segmento 1	2009	3LPE	609.6	28,3
Segmento 2	2000	3LPE	609.6	19.3
Segmento 3	1990	FBE	609.6	21
Segmento 4	1990	PE TAPE	609.6	20
Segmento 5	1990	FBE	609.6	10

El estudio se sustentó en el análisis de datos provenientes de inspecciones internas en línea (ILI) realizadas en los años 2016 y 2022, considerando exclusivamente los defectos de origen externo. Los hallazgos obtenidos permitieron identificar, clasificar y dimensionar las anomalías presentes en la cañería, así como evaluar su evolución temporal y tasa de crecimiento.

Estas inspecciones fueron complementadas con relevamientos de potenciales paso a paso (CIS) y con la detección de discontinuidades en el revestimiento mediante la técnica de gradiente de tensión de corriente continua (DCVG). La integración de estas metodologías permitió caracterizar la respuesta eléctrica del sistema, evaluar la efectividad de la protección catódica e identificar posibles fallas o defectos en el revestimiento externo.

Asimismo, se realizaron investigaciones de suelo en puntos estratégicamente distribuidos a lo largo de la traza del gasoducto. En cada sitio se extrajeron muestras a la profundidad de instalación de la cañería (1 m de tapada), a fin de determinar parámetros relevantes tales como resistividad eléctrica, pH, contenido de humedad y distribución granulométrica. Complementariamente, se efectuaron mediciones de resistividad del suelo cada 200 metros, con el objetivo de obtener una caracterización continua de las condiciones del entorno.

Finalmente, la totalidad de la información recopilada fue integrada, depurada y procesada mediante herramientas de análisis estadístico implementadas en Python, utilizando librerías especializadas como NumPy, Pandas, Matplotlib y Scikit-learn. El tratamiento de los datos siguió un enfoque exploratorio y correlacional, orientado a identificar relaciones estadísticamente significativas entre las variables críticas del sistema, incluyendo tipo y estado del revestimiento, propiedades del suelo, comportamiento eléctrico y ocurrencia de defectos.

En particular, el análisis se focalizó en la comparación del desempeño de los distintos sistemas de revestimiento instalados a lo largo de la cañería bajo condiciones similares de suelo y protección catódica, con el propósito de evaluar su durabilidad relativa y su resistencia a los mecanismos de degradación en condiciones reales de servicio.

Resultados

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis integral de los distintos métodos de inspección y relevamiento implementados. Mediante la correlación sistemática de datos provenientes de inspecciones internas (ILI), perfiles de potenciales a intervalos cortos (CIS), detección de discontinuidades mediante la técnica de gradiente de tensión de corriente continua (DCVG) y caracterizaciones geotécnicas del suelo, se identificaron patrones consistentes en el desempeño de los sistemas de revestimiento bajo condiciones de contorno específicas.

La integración de estas fuentes de información permitió establecer relaciones determinísticas entre las variables operativas y ambientales y el comportamiento observado de los materiales. En consecuencia, se obtuvo una caracterización técnica integral del desempeño de los distintos sistemas de revestimiento a lo largo de la traza del gasoducto, posibilitando una comparación rigurosa y objetivamente fundamentada en función de las condiciones reales de servicio.

Condiciones del Suelo

Los estudios de suelo constituyen un componente esencial en la evaluación de las condiciones ambientales que rodean a los sistemas de revestimiento de tuberías enterradas. La determinación de parámetros tales como resistividad eléctrica, contenido de humedad, concentración de sales solubles y pH permite caracterizar el nivel de agresividad del medio, identificando sectores donde las condiciones geoquímicas pueden favorecer la aceleración de los mecanismos de degradación del revestimiento y, eventualmente, del sustrato metálico.

A lo largo del gasoducto se ejecutaron un total de 38 excavaciones, en las cuales se realizaron investigaciones de suelo a la profundidad de instalación del ducto. Estas campañas permitieron obtener información representativa de las condiciones reales de exposición del sistema.

La Tabla 2 presenta un resumen de los valores promedio de los principales parámetros del suelo determinados a lo largo de la traza de la cañería.

PH	Contenido de Arena (%)	Contenido de Limo (%)	Contenido de Arcilla (%)	Tio de suelo predominante
7.9 ± 1.3	64 ± 22	25 ± 16	9 ± 7	Franco arenoso

La Figura 1 ilustra el perfil de resistividad del tramo, relevado mediante el método de Wenner con una medición cada 200 metros. El gráfico integra dos representaciones: en color gris se muestran los registros originales (brutos), mientras que la traza azul representa la tendencia suavizada obtenida a partir de las mediciones puntuales.

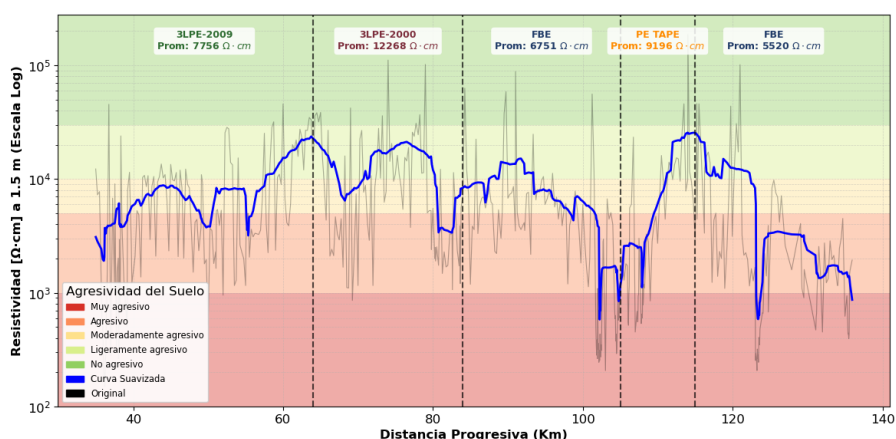


Figura 1: Perfil de Agresividad del Suelo y Tipos de Revestimiento

La Tabla 3 presenta el resumen de los resultados correspondientes a los estudios de resistividad del suelo. El análisis evidencia que, en términos generales, el perfil de resistividades de la traza se caracteriza por valores predominantemente superiores a 5.000 ohm·cm, lo que indica condiciones de agresividad moderada a baja en la mayor parte del recorrido.

No obstante, se identificaron sectores puntuales con valores de resistividad significativamente inferiores, asociados a una mayor agresividad del medio. Estas zonas se localizan principalmente en segmentos revestidos con FBE, lo que resulta de particular interés en el análisis comparativo del desempeño de los distintos sistemas de revestimiento.

A continuación, se presenta la resistividad media calculada para cada segmento, a efectos de establecer un parámetro de referencia para la evaluación técnica.

	3LPE-2009	3LPE-2009	FBE-primer segmento	PE-TAPE	FBE-segundo segmento
Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	7756	12268	6751	9196	5520

A partir de estos análisis, se concluye que la mayor parte del ducto se encuentra emplazada en un suelo de agresividad moderada. No obstante, se han identificado sectores específicos con revestimiento epoxi (FBE) donde las condiciones del terreno presentan una mayor agresividad.

Protección Catódica

La protección catódica constituye un método electroquímico destinado a mitigar la corrosión en estructuras metálicas enterradas, tales como gasoductos, mediante la polarización del metal a potenciales en los que se inhiben las reacciones anódicas de oxidación. En este esquema, la estructura a proteger se comporta electroquímicamente como un cátodo, reduciendo significativamente su velocidad de corrosión.

Existen dos configuraciones principales de protección catódica: los sistemas por corriente impresa, que emplean una fuente de energía externa para suministrar corriente continua al sistema, y los sistemas de ánodos galvánicos o de sacrificio, en los cuales la corriente es generada por la diferencia de potencial natural entre metales disímiles. La cañería objeto de estudio opera bajo un sistema de corriente impresa, lo que permite un control más preciso de los niveles de polarización y una mayor eficiencia en la mitigación de la corrosión a lo largo de extensos tramos.

La Figura 2 muestra el estado operativo del sistema de protección catódica correspondiente al año 2022, coincidente con la ejecución de la inspección interna (ILI), permitiendo así correlacionar el desempeño electroquímico con los resultados de integridad estructural obtenidos.

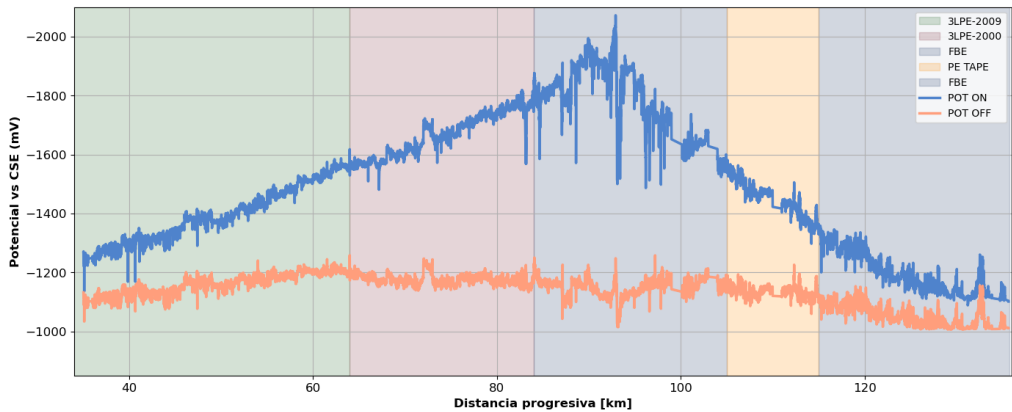


Figura 2: Perfil de potenciales ON/OFF

Como se observa en el perfil de potenciales, la polarización a lo largo de todo el segmento de la cañería se mantiene por debajo (más negativa) de -850 mV, dando cumplimiento al Criterio 1.2 establecido en el estándar AMPP SP0169 para la mitigación de la corrosión externa.

Se identifica una tendencia decreciente en las proximidades del KP 94, sector que coincide con la ubicación de una planta compresora. Esta variación puede atribuirse a la influencia del sistema de puesta a tierra asociado a dichas instalaciones, el cual puede generar interferencias o redistribuciones locales de corriente. No obstante, aun en ese sector, los valores registrados no descienden por encima del umbral crítico de -850 mV, manteniéndose dentro del rango aceptable de protección.

Resulta relevante destacar que, desde el punto de vista del suministro de corriente y nivel de polarización, la totalidad de la cañería se encuentra sometida a condiciones homogéneas de protección catódica. Esta uniformidad constituye una condición particularmente favorable para el presente análisis, ya que permite evaluar comparativamente la eficacia de los distintos sistemas de revestimiento bajo un mismo escenario de protección.

Herramienta de Inspección Interna

Las herramientas de inspección interna (ILI) basadas en tecnología de pérdida de flujo magnético (MFL) permiten detectar reducciones de espesor de pared asociadas a procesos corrosivos mediante la identificación de distorsiones en el campo magnético inducido en la pared de la cañería. Esta técnica presenta alta sensibilidad frente a defectos volumétricos y constituye una metodología ampliamente validada para la evaluación de la integridad mecánica de gasoductos en operación.

La presente sección expone los resultados correspondientes a dos corridas MFL realizadas en 2016 y 2022, con el propósito de analizar la evolución y el crecimiento de defectos externos en los distintos segmentos de la cañería.

En la Figura 3, el eje primario representa el conteo acumulado de defectos externos detectados en ambas inspecciones (2016 y 2022). La pendiente de dichas curvas permite identificar variaciones en la tasa de ocurrencia de defectos a lo largo del trazado, las cuales pueden correlacionarse con el tipo de revestimiento presente en cada tramo. Por su parte, el eje secundario, representado mediante un gráfico de barras, indica la densidad de defectos por kilómetro para cada campaña de inspección. Las líneas verticales señalan los puntos de transición entre distintos sistemas de revestimiento, proporcionando una referencia visual que facilita la asociación entre los patrones de daño observados y el esquema de protección superficial aplicado en cada segmento.

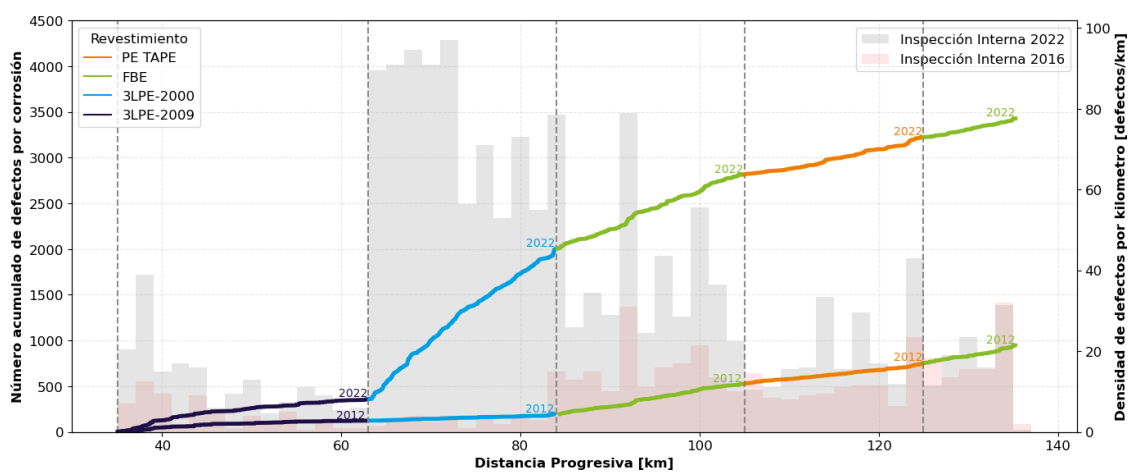


Figura 3: Comparación de la acumulación y densidad de defectos por corrosión

Revestimiento 3LPE

Como se indicó previamente, dos tramos de la cañería se encuentran revestidos con polietileno tricapa (3LPE), correspondientes a instalaciones ejecutadas en los años 2000 y 2009, respectivamente.

El análisis comparativo entre las corridas de inspección de 2016 y 2022 evidencia una tendencia marcada en el segmento instalado en el año 2000, donde se observa un incremento significativo en la densidad de defectos respecto de la primera inspección. En términos cuantitativos, la densidad de defectos por kilómetro en este tramo aumentó aproximadamente en un factor de ocho en relación con los valores registrados en 2016.

Resulta particularmente relevante que ambos segmentos revestidos con 3LPE se encuentran sometidos a condiciones equivalentes de protección catódica y presentan características de suelo comparables en términos generales, lo que reduce la influencia de variables externas y refuerza la hipótesis de un desempeño diferencial asociado al sistema de revestimiento o a factores constructivos específicos.

Asimismo, se identificó un aumento considerable en el recuento de defectos dentro de los primeros 5 km del segmento más reciente de 3LPE. En este sector inicial, la resistividad del terreno es notoriamente inferior respecto del resto del tramo tricapa, lo que implica un medio más agresivo desde el punto de vista electroquímico. Esta condición podría estar contribuyendo al incremento localizado de defectos observado, y constituye un factor relevante a considerar en el análisis integral del desempeño del revestimiento.

Revestimiento FBE

Se observa una tendencia ascendente en la densidad de defectos en el primer segmento revestido con FBE (Progresivas 104–115), evidenciando un incremento promedio del orden del 40 % en comparación con los resultados obtenidos en la inspección de 2016.

En contraste, el segundo segmento revestido con FBE presenta un aumento prácticamente insignificante en la densidad de defectos entre ambas corridas de inspección. Cabe destacar que este último corresponde al tramo con menor resistividad de todo el sector bajo estudio, es decir, aquel asociado a las condiciones de mayor agresividad electroquímica del suelo.

Este resultado adquiere particular relevancia técnica, dado que evidencia un desempeño relativamente estable del revestimiento en el entorno más exigente desde el punto de vista de resistividades, lo que refuerza la necesidad de analizar en profundidad la interacción entre las condiciones de suelo, el estado del revestimiento y la eficacia del sistema de protección catódica.

Revestimiento PE TAPE

Se observa un incremento relativamente moderado en la densidad de defectos entre ambas corridas de inspección, particularmente al compararlo con los segmentos revestidos con 3LPE, donde las tasas de crecimiento resultaron significativamente mayores.

En el caso del segmento revestido con PE Tape, el aumento en la densidad de defectos es levemente superior al registrado en el segundo tramo de FBE; sin embargo, ambos comportamientos se mantienen dentro del mismo orden de magnitud. Este resultado sugiere una evolución controlada de los procesos de degradación en estos sistemas, sin evidenciar variaciones abruptas en la tasa de ocurrencia de defectos durante el período analizado.

Evolución de la Profundidad de los Defectos

El monitoreo de las profundidades de los defectos reportados en las inspecciones internas (ILI), junto con el análisis del crecimiento promedio entre corridas, constituye una herramienta clave para evaluar la evolución temporal de los procesos corrosivos en la cañería. Dado que los niveles de protección catódica son comparables en todos los segmentos, este enfoque permite analizar con mayor objetividad la efectividad relativa de los distintos sistemas de revestimiento en la mitigación de la corrosión y en la preservación de la integridad estructural del gasoducto.

La Figura 4, segmentada por tipo de revestimiento, presenta el incremento promedio porcentual en la profundidad de los defectos entre las inspecciones de 2016 y 2022 como variable principal del gráfico. Este indicador sintetiza la tasa de crecimiento relativa de las anomalías en cada segmento, permitiendo comparar el comportamiento de los distintos sistemas de protección bajo condiciones operativas equivalentes.

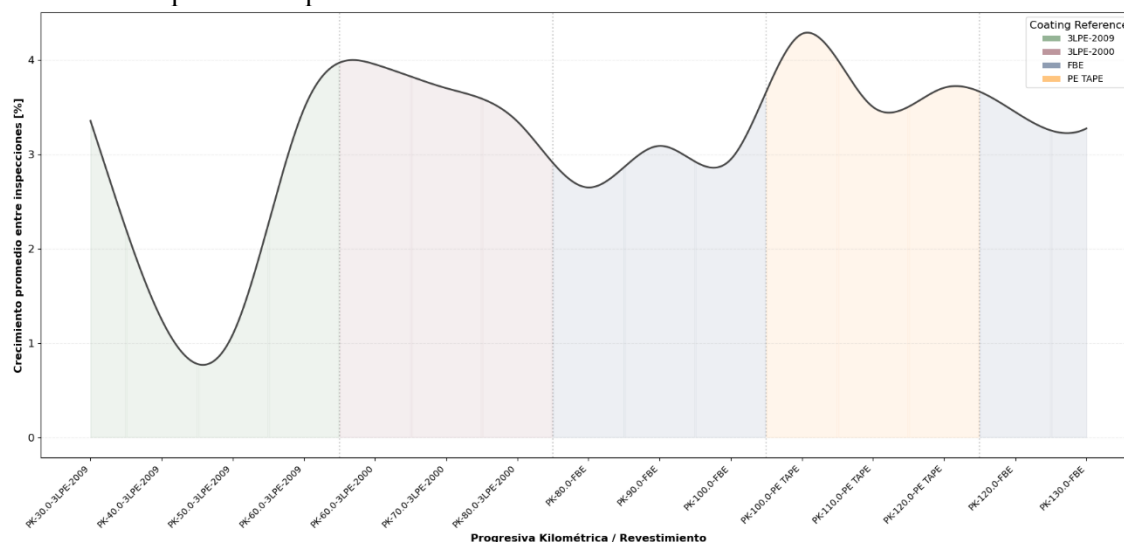


Figura 4: Tendencia de crecimiento suavizada con identificación sutil de revestimiento

Los datos revelan los siguientes hallazgos clave:

- Los revestimientos 3LPE y PE TAPE (cinta de PE) exhibieron el mayor crecimiento promedio de defectos. Por el contrario, los segmentos de cañería con revestimiento FBE mostraron niveles de crecimiento significativamente menores.
- El revestimiento 3LPE instalado en 2009 experimentó un crecimiento bajo entre los mojones kilométricos 40 y 50, pero mostró un aumento alarmantemente alto en su sección inicial, a pesar de tener solo 15 años de servicio.

Distribución Circunferencial de Defectos

El análisis de la distribución circunferencial de los defectos constituye un aspecto clave en la evaluación de la integridad estructural de la cañería, ya que permite identificar sectores específicos del tubo donde se concentra el daño, tales como la generatriz inferior (posición 6 en punto) o las zonas laterales. Esta información resulta particularmente relevante debido a que determinadas posiciones pueden estar más expuestas a esfuerzos mecánicos inducidos por el terreno circundante, comúnmente denominados soil stress, los cuales pueden afectar tanto la integridad del revestimiento como la pared metálica.

La interacción entre estos esfuerzos mecánicos y la presencia de defectos corrosivos puede favorecer la propagación del daño, acelerar los mecanismos de degradación y comprometer la efectividad del sistema integral de protección contra la corrosión, incrementando consecuentemente la probabilidad de falla.

La Figura 5 presenta la distribución circunferencial de los defectos identificados en la corrida de inspección de 2022, representados en sentido horario y segmentados según el tipo de revestimiento. Para su elaboración, se realizó el recuento de los defectos correspondientes a cada posición circunferencial dentro de cada segmento revestido, permitiendo comparar los patrones de concentración de daño entre los distintos sistemas de protección superficial.

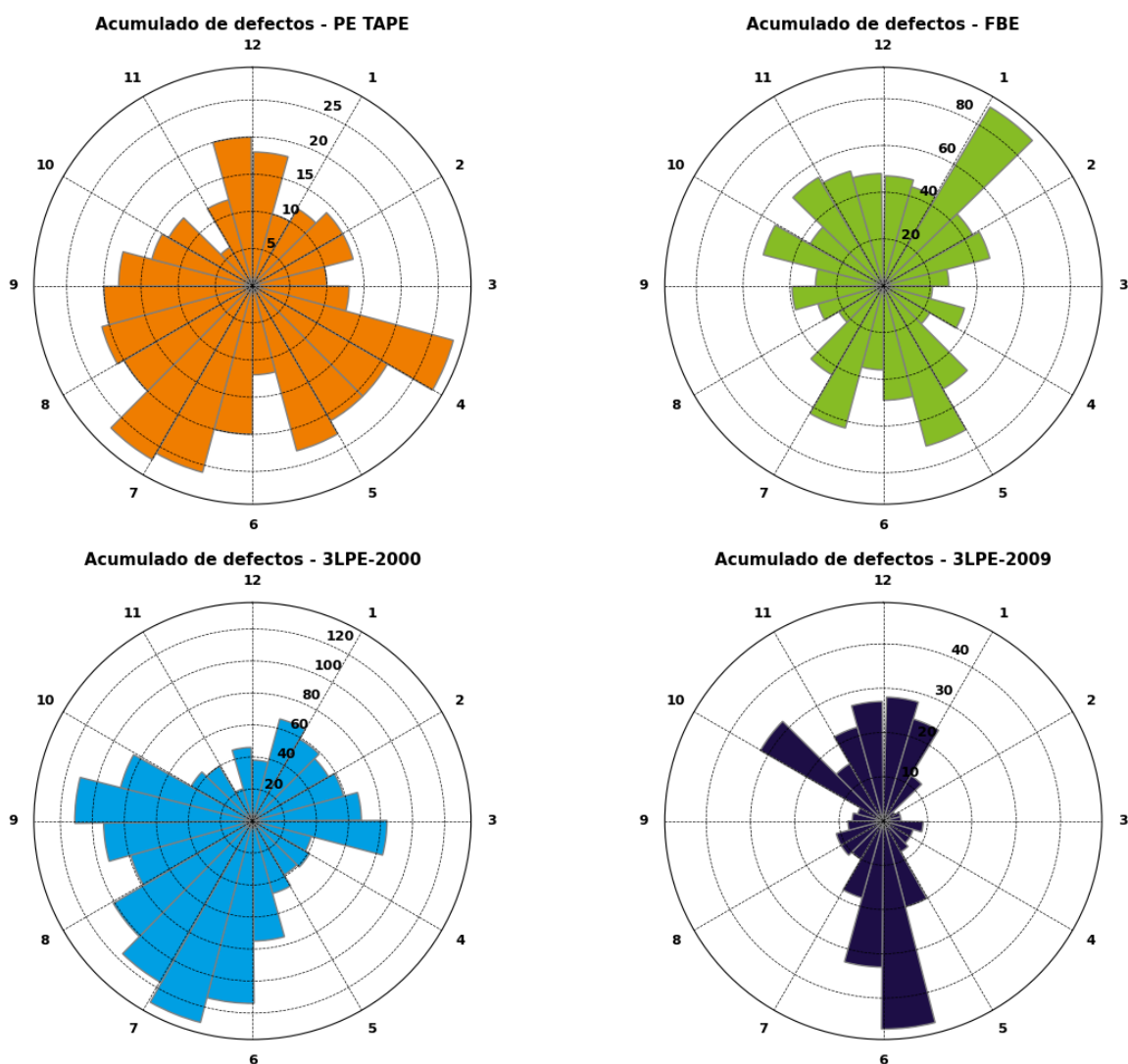


Figura 5: Distribución circunferencial de defectos

Esta representación permite identificar las siguientes tendencias relevantes:

Revestimiento PE Tape

Se observa una marcada correlación en la distribución circunferencial de los defectos, evidenciando un patrón claro de concentración. Este comportamiento puede asociarse a la susceptibilidad de este sistema frente a los esfuerzos inducidos por el suelo (soil stress), los cuales generan cargas diferenciales en el entorno del ducto capaces de provocar fallas mecánicas, desadherencias o desprendimientos del revestimiento. La concentración de defectos resulta particularmente evidente entre las posiciones comprendidas aproximadamente entre las 4 y las 8 en punto de la circunferencia del tubo, sector que coincide con la generatriz inferior-lateral, típicamente más expuesta a sollicitaciones mecánicas del terreno. Estas condiciones favorecen la degradación localizada del sistema PE Tape y la subsecuente aparición de defectos corrosivos.

Revestimiento FBE

En los segmentos revestidos con epoxi adherido por fusión (FBE), la distribución circunferencial de los defectos no evidencia un patrón definido o repetitivo. Esta dispersión sugiere que, bajo las condiciones analizadas, no existe una posición preferencial para la iniciación o propagación de defectos, lo que podría indicar un comportamiento más homogéneo frente a las solicitaciones mecánicas y ambientales.

Revestimiento 3LPE

En el caso del polietileno tricapa (3LPE), se identifica una tendencia significativa hacia la concentración de defectos en la sección inferior de la cañería (zona cercana a las 6 en punto). Este patrón podría estar vinculado tanto a condiciones de mayor retención de humedad como a concentraciones de esfuerzos mecánicos en la generatriz inferior, factores que, en conjunto, pueden favorecer la degradación localizada del sistema de revestimiento.

Distribución Axial de Defectos

El análisis de la distribución axial de los defectos constituye una herramienta fundamental para identificar zonas críticas a lo largo de la traza donde se concentra el daño. Este enfoque permite detectar patrones asociados a posibles deficiencias en los sistemas de protección, transiciones entre distintos tipos de revestimiento, particularidades constructivas, como juntas soldadas, o variaciones en las condiciones ambientales externas.

La Figura 6 presenta la distribución de los defectos referenciados entre soldaduras, permitiendo evaluar su localización relativa dentro de cada tramo de tubo. Esta representación facilita la identificación de posibles concentraciones de daño en proximidades de uniones soldadas, extremos de caños o sectores específicos del cuerpo del tubo, aportando información relevante para el análisis de integridad y la planificación de intervenciones futuras.

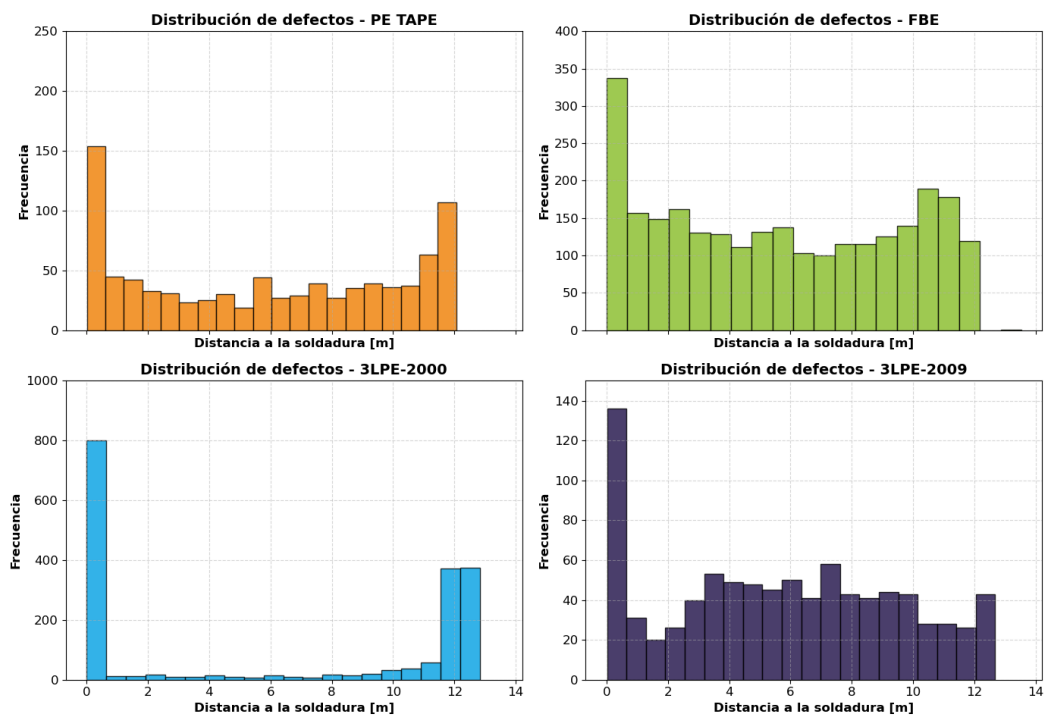


Figura 6: Distribución de la distancia de los defectos a la soldadura por tipo de revestimiento

Se evidencia una marcada concentración de defectos en los extremos de los tubos (longitudes típicas de 12 m), particularmente en el segmento revestido con 3LPE instalado en el año 2000. Este comportamiento sugiere la presencia de problemáticas recurrentes asociadas a las juntas

soldadas. En dichos sectores, el sistema de protección superficial se completa mediante mantas termocontraíbles aplicadas en campo para sellar la continuidad del esquema 3LPE, lo que introduce una interfaz potencialmente más vulnerable en términos de adherencia, control de calidad y desempeño a largo plazo.

En el caso del revestimiento de cinta plástica (Plastic Tape), se identifican patrones similares de concentración de defectos en proximidad a las uniones. En este sistema, la cinta de polietileno era aplicada manualmente en los extremos de los tubos, a diferencia del recubrimiento principal colocado en un entorno de obrador bajo condiciones más controladas. Esta diferencia en el proceso de aplicación podría haber influido en la calidad final del revestimiento en las juntas. Asimismo, el efecto de apantallamiento asociado tanto a la cinta como a las mantas termocontraíbles, que puede limitar la eficacia de la protección catódica en presencia de desadherencias, incrementa la susceptibilidad al desarrollo y crecimiento de defectos corrosivos en estos sectores.

Por el contrario, los segmentos correspondientes al 3LPE instalado en 2009 y al revestimiento FBE presentan una distribución axial de defectos considerablemente más homogénea. No obstante, se observa una leve tendencia hacia mayores concentraciones en el inicio de cada tramo de tubo, fenómeno que podría estar relacionado con particularidades constructivas.

Relevamientos DCVG

El relevamiento mediante la técnica DCVG (Direct Current Voltage Gradient) constituye un método indirecto para la evaluación de la integridad del revestimiento en gasoductos que operan bajo protección catódica. A través de la medición de gradientes de potencial en la superficie del terreno, esta metodología permite localizar con precisión fallas, identificando puntos donde existe una discontinuidad del revestimiento.

La Figura 7 presenta la densidad de indicaciones detectadas por DCVG, representada de manera análoga al conteo acumulado de defectos externos identificados por inspección interna (ILI). Con el fin de facilitar el análisis comparativo, se incluyen en forma conjunta la densidad de defectos reportados por ILI (correspondiente a la corrida de 2022) y las indicaciones obtenidas mediante DCVG.

Esta representación permite realizar una evaluación segmento por segmento según el tipo de revestimiento aplicado, con el objetivo de identificar posibles correlaciones entre la degradación del revestimiento (detectada superficialmente por DCVG) y la pérdida de espesor del acero (detectada internamente por ILI), contribuyendo así a una interpretación integrada del estado del sistema de protección.

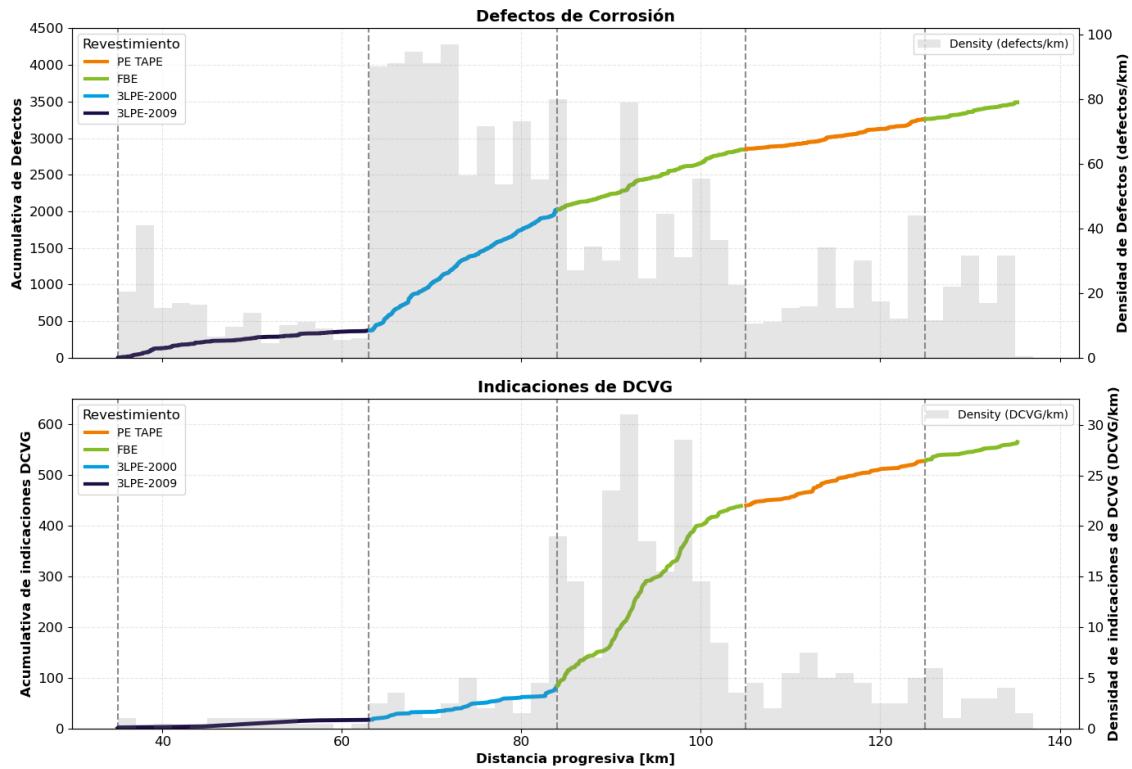


Figura 7: Comparación entre indicaciones de DCVG y defectos reportados por inspección interna

Para concluir, de manera análoga a la distribución axial de defectos reportados por la herramienta de inspección en línea (ILI) en cada segmento de tubería, la Figura 8 presenta la distribución axial de las indicaciones relevadas mediante el estudio DCVG.

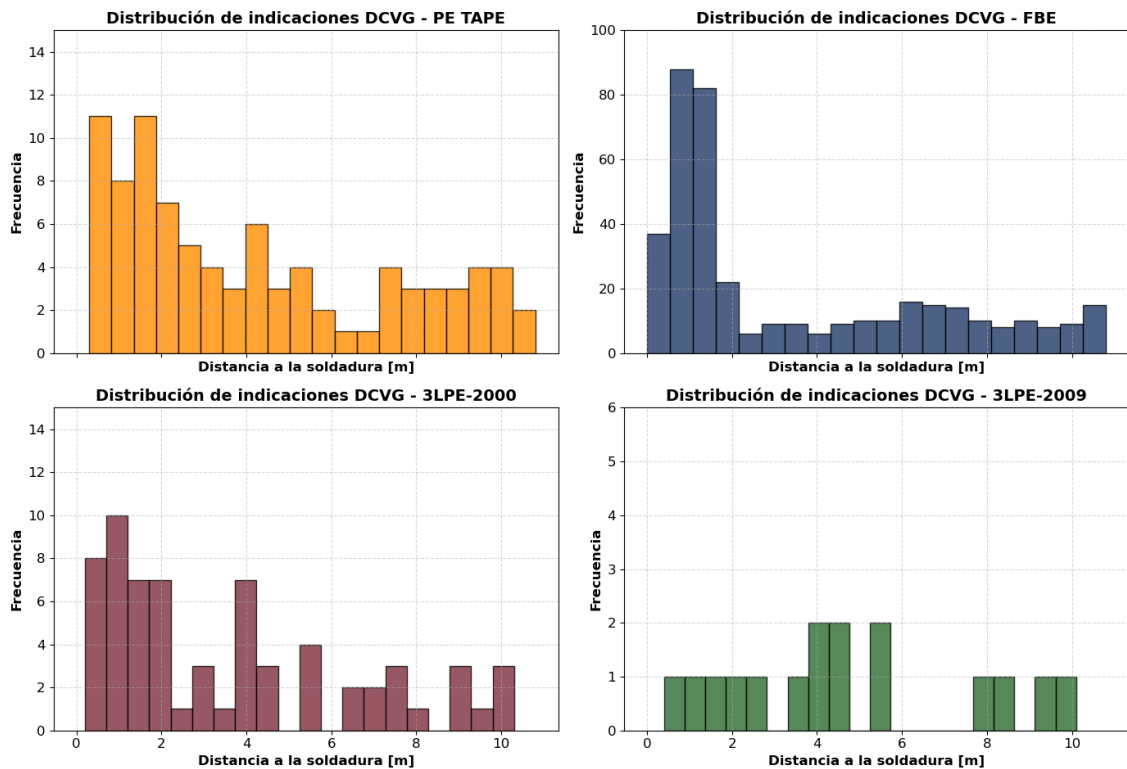


Figura 8: Distribución de la distancia de los defectos con indicación DCVG a la soldadura por tipo de revestimiento

El análisis comparativo de los gráficos anteriores evidencia que la mayor densidad de indicaciones detectadas mediante DCVG se concentra en los segmentos revestidos con FBE. Cabe destacar que estos tramos corresponden, además, a las zonas con menor resistividad de todo el sector bajo estudio, es decir, aquellas asociadas a las condiciones de mayor agresividad electroquímica del suelo.

En contraste, tal como se expuso previamente a partir de los resultados de ILI, la mayor densidad de defectos con pérdida de espesor se registra en el tramo correspondiente al revestimiento 3LPE instalado en el año 2000.

Desde una perspectiva teórica, cabría esperar una correlación directa entre la densidad de indicaciones de DCVG y el número de defectos identificados por ILI, dado que un mayor número de señales de DCVG suele asociarse con una mayor cantidad de discontinuidades en el revestimiento y, por ende, con una mayor exposición del acero al electrolito. Sin embargo, la discrepancia observada sugiere un comportamiento diferencial en el caso del sistema 3LPE.

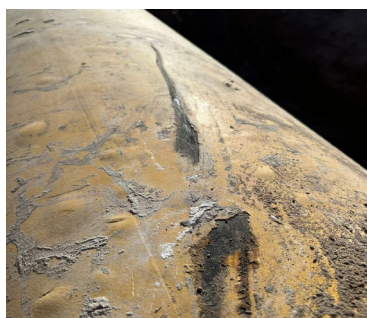
En particular, los resultados indican que el crecimiento de defectos en el segmento 3LPE podría estar ocurriendo bajo condiciones de apantallamiento, especialmente en las zonas de extremos de tubo donde se emplean mantas termocontraíbles para el sellado de juntas. En estos sectores, la posible falla de adherencia del revestimiento puede generar cavidades o espacios confinados donde se desarrolla corrosión activa, mientras que la señal superficial detectada por DCVG se ve atenuada o enmascarada, dificultando su identificación desde la superficie. Este fenómeno explicaría la menor densidad de indicaciones DCVG en un tramo que, sin embargo, presenta una elevada densidad de defectos metalúrgicos detectados por inspección interna.

Hallazgos

En base al trabajo previamente detallado, se decidió ejecutar pozos exploratorios con el objetivo de validar las hipótesis formuladas a partir del análisis de datos y del modelo implementado. A continuación, se detallan los hallazgos obtenidos en cada caso.

1- Fusion Bonded Epoxi

Se identificaron diversas indicaciones detectadas durante el estudio DCVG, las cuales fueron posteriormente excavadas para su verificación en campo. A continuación, se presenta el registro fotográfico correspondiente a los hallazgos obtenidos.



Como se puede observar, las indicaciones halladas son compatibles con daños mecánicos originados durante la etapa constructiva, condición ampliamente documentada para este tipo de sistema de revestimiento, particularmente por su susceptibilidad a esfuerzos e impactos durante la instalación.

Más allá de este hallazgo, resulta relevante destacar que en ninguno de los defectos de revestimiento expuestos se evidenció corrosión activa, observándose únicamente una capa pasiva de óxido superficial. Asimismo, en las inmediaciones de las indicaciones, el revestimiento FBE

se encontraba ampollado, registrándose valores de pH de carácter alcalino, condición consistente con ambientes bajo protección catódica.

2- Polietileno tricapa – Mantas termocontraíbles



Se identificó corrosión activa debajo de las mantas termocontraíbles, en concordancia con lo previamente reportado por la herramienta de inspección en línea (ILI). Todas las mantas intervenidas presentaban muy baja adherencia, y el revestimiento integral de la cañería también evidenciaba pérdida significativa de adherencia.

Tal como ocurre en fenómenos de apantallamiento, los valores de pH medidos debajo del revestimiento tendían a ser neutros o levemente ácidos, condición compatible con la pérdida de efectividad de la protección catódica en esas zonas específicas.

3- Cintas Plásticas



Tal como se observa en la imagen, los efectos del suelo se manifiestan con mayor intensidad en la parte inferior del revestimiento, favoreciendo el ingreso de electrolito hasta la superficie metálica y generando las condiciones propicias para el desarrollo de corrosión.

Discusión de los resultados

La corrosión bajo condiciones de apantallamiento en sistemas 3LPE constituye un fenómeno ampliamente documentado en la industria. Este proceso se inicia cuando el revestimiento pierde adherencia y permite el ingreso de electrolito o agua al espacio interfacial entre el recubrimiento y el acero. En estas cavidades confinadas, la acción de la protección catódica se ve limitada o anulada, generándose un entorno propicio para el desarrollo de corrosión activa no controlada, frecuentemente denominada “corrosión libre”, que puede progresar sin manifestaciones evidentes en superficie.

El caso analizado refleja con claridad este mecanismo. En el segmento revestido con 3LPE e instalado en el año 2000, la densidad de defectos se incrementó aproximadamente un 800 % en un período de seis años. No obstante, dado que la profundidad promedio de los defectos no supera

el 20 % del espesor nominal, no se configura actualmente una condición de riesgo operativo inmediato. El análisis de la distribución axial mostró que más del 90 % de los defectos se concentran en los extremos de los tubos, lo que vincula el fenómeno principalmente con las zonas revestidas mediante mantas termocontraíbles. Con el fin de discriminar entre corrosión por exposición directa y corrosión bajo apantallamiento, se realizó un relevamiento DCVG. Sin embargo, la escasa cantidad de indicaciones detectadas y la falta de correspondencia axial con los defectos localizados bajo las mantas refuerzan la hipótesis de un proceso apantallado.

Adicionalmente, el segmento revestido con 3LPE e instalado en 2009 exhibió un comportamiento similar en sus primeros 5 km. Este hallazgo resulta particularmente relevante, dado que un tramo con menos de 15 años de servicio, protegido con tecnología 3LPE, presenta una densidad de defectos comparable a la observada en segmentos revestidos con FBE que superan los 35 años de operación.

En el caso del revestimiento FBE, se registró un incremento del orden del 40 % en la densidad de defectos durante el período evaluado, con una profundidad promedio cercana al 15 %. Es importante considerar que los segmentos FBE se ubican en las zonas de menor resistividad de todo el tramo analizado, es decir, en las condiciones de mayor agresividad del suelo. Asimismo, estos segmentos presentaron la mayor densidad de indicaciones de DCVG, lo que evidencia una mayor cantidad de discontinuidades superficiales en el revestimiento. No obstante, dicha mayor superficie potencialmente expuesta no se traduce en un aumento proporcional de defectos detectados por ILI, lo que sugiere una adecuada efectividad de la protección catódica en estos sectores.

Este comportamiento permite concluir que, aun siendo más antiguos y encontrándose en el entorno más agresivo desde el punto de vista de resistividad del suelo, los segmentos FBE desarrollaron una densidad de defectos por kilómetro significativamente inferior a la del 3LPE-2000. Estos últimos, pese a presentar menos indicaciones de DCVG, exhiben una mayor densidad de pérdida de espesor, lo que pone de manifiesto el efecto del apantallamiento catódico característico de sistemas multicapa. Del mismo modo, el análisis del 3LPE-2009 revela una densidad de defectos comparable a la de FBE con más de tres décadas de servicio, reforzando esta interpretación.

Por su parte, el revestimiento PE Tape muestra un comportamiento similar al del FBE, e incluso presenta una menor densidad de defectos con profundidades promedio comparables. La mayoría de las anomalías se concentran entre las posiciones de las 4 y las 8 en punto de la circunferencia del tubo, patrón típicamente asociado al denominado “efecto suelo”. Este fenómeno, característico de este sistema, tiende a intensificarse con el tiempo debido a la acción combinada de la humedad, la carga del terreno y la progresiva pérdida de adherencia.

Finalmente, el elevado número de indicaciones de falla del revestimiento detectadas en el primer segmento FBE podría estar vinculado a deficiencias constructivas. Factores tales como una granulometría inadecuada durante el backfilling o una manipulación incorrecta de los tubos durante la instalación pueden haber contribuido a generar daños mecánicos en el revestimiento. Es conocido que los tubos revestidos con FBE requieren cuidados especiales en su manipulación, y en este caso no se contó con un sistema DUAL-FBE que incremente la resistencia mecánica. Sin embargo, aun con una mayor cantidad de discontinuidades superficiales y estando emplazado en el sector de menor resistividad del trazado, este segmento no presenta una densidad elevada de defectos. Esta diferencia, frente al desempeño observado en los sistemas 3LPE, vuelve a destacar el rol crítico del apantallamiento catódico en revestimientos multicapa, donde procesos de corrosión activa pueden desarrollarse bajo un recubrimiento aparentemente intacto.

Conclusión

El propósito del presente estudio fue evaluar el desempeño de una cañería revestida con los principales sistemas de protección anticorrosiva disponibles en el mercado. Dado que todos los segmentos analizados estuvieron sometidos a condiciones equivalentes de protección catódica y a características de suelo comparables, incluyendo el hecho de que los tramos con FBE se encuentran en las zonas de menor resistividad del trazado, es decir, las más agresivas desde el punto de vista electroquímico, fue posible establecer una comparación objetiva de su comportamiento real como barrera frente a la corrosión.

Los resultados indican que el sistema 3LPE presenta una debilidad significativa en las juntas de los tubos, donde el revestimiento se completa mediante mantas termocontraíbles aplicadas en campo. En estos sectores se concentra la mayor parte de los defectos detectados, evidenciando un patrón consistente con procesos de corrosión bajo apantallamiento. Este fenómeno coincide con la experiencia operativa acumulada por Transportadora de Gas del Norte S.A. (TGN) respecto a este tipo de sistema, y genera una preocupación particular a futuro, dado que los defectos se desarrollan en condiciones que limitan la acción efectiva de la protección catódica.

Los revestimientos 3LPE, comúnmente denominados “tricapa”, son ampliamente utilizados en el mercado argentino debido a su elevada resistencia mecánica y robustez, lo que facilita su adaptación a diversas condiciones constructivas. Desde el punto de vista teórico, su estructura multicapa y su elevada adherencia al sustrato metálico deberían conferirles excelentes propiedades anticorrosivas. Sin embargo, la evidencia de campo demuestra que esta expectativa no siempre se cumple. Se han identificado numerosos casos de adherencia deficiente o inexistente, favoreciendo la generación de cavidades interfaciales propicias para el apantallamiento catódico. Asimismo, se han observado mecanismos de degradación ambiental y agrietamiento del revestimiento. En el ámbito de TGN, la denominada “corrosión bajo manta” ha sido reconocida como un mecanismo específico asociado a los sectores de juntas aplicadas en campo. Ya sea por deficiencias en la aplicación durante la construcción o por problemas en la calidad del material termocontraíble, este tipo de fallas se presenta con una frecuencia significativa y representa un riesgo relevante en términos de integridad a largo plazo.

En contraste, los resultados obtenidos para el revestimiento FBE demuestran una mayor compatibilidad con la protección catódica. Si bien se registró un número elevado de indicaciones de DCVG, posiblemente asociado a daños de construcción o manipulación inadecuada durante la instalación, considerando la menor resistencia mecánica de este sistema y su localización en los sectores de menor resistividad del suelo, la pérdida de espesor detectada por ILI no alcanzó niveles comparables a los observados en los segmentos 3LPE. Esto sugiere que, pese a sus limitaciones mecánicas, el FBE permite una acción más efectiva de la protección catódica sobre las áreas expuestas, limitando la progresión de la corrosión y reduciendo el desarrollo de defectos profundos.

En consecuencia, los resultados del estudio ponen de manifiesto que la robustez mecánica de un sistema multicapa no necesariamente se traduce en un mejor desempeño anticorrosivo en condiciones reales de operación, particularmente cuando existen fenómenos de apantallamiento que comprometen la eficacia del sistema integral de protección.

Bibliografía

1. AMPP. (2024). *AMPP SP 169-2024: Standard practice for the cathodic protection of pipeline systems*. Association for Materials Protection and Performance.
2. ENARGAS. (2009). *NAG 108: Revestimientos anticorrosivos de cañerías y accesorios*. Ente Nacional Regulador del Gas.
3. C3L-037-IA-IL-16P0602-0 Informe Final ILI (2016) :*Inspeccion de Pérdida de Metal de Alta Resolución, Geometría básica & Mapeo de Alta Resolución MFL-A / MD*.
4. 5400-12894_24TRA037_FR-BCG_ESP_EVA_2022-0229_Rev0 (2022): *Inspeccion de Pérdida de Metal de Alta Resolución, Geometría básica & Mapeo de Alta Resolución MFL-A / MD*.
5. 21067.22.03-PC-IF-1901-R1 (Informe ECDA C3L) (2022) : *Informe ecda*