

EXPERIENCIA EN LA UTILIZACION DE TECNICA DE INSPECCION POR MEMORIA MAGNETICA DE METAL Y REPARACION EN FRIO CAÑERÍA 24”.

Agustín J. Marcuzzi, Camuzzi, agustin.marcuzzi@camuzzigas.com.ar

Matías P. Pirotti, Camuzzi, matias.pirotti@camuzzigas.com.ar

Alejandro Lorenzo, Camuzzi, alejandro.lorenzo@camuzzigas.com.ar

Sinopsis

La alimentación de gas a la ciudad de La Plata y alrededores se realiza a través de una cañería de 24” Dn y la misma constituye uno de los principales activos de Camuzzi teniendo en cuenta la cantidad de usuarios asociados a su operación.

Dicha cañería, tiene una antigüedad considerable (61 años) y no está preparada para el pasaje de *scrapers* inteligentes.

Por este motivo, Camuzzi venía utilizando metodologías de inspección directa (la combinación de estudios CIS-DCVG y pozos de inspección) a los efectos de verificar la integridad de la misma.

Adicionalmente y ante el ofrecimiento de un proveedor local de realizar una prueba con un método de inspección por un método no muy explorado en el país como el de Memoria Magnética de Metal (MMM), se sometió a la cañería a dicha inspección y se encontraron tres anomalías de importante magnitud (según el tipo de reporte de este tipo de estudio).

Este método requiere una inspección directa para caracterizar las anomalías y luego de realizar las mismas, se verificó que una de estas se correspondía con un importante defecto de laminación en el caño y para caracterizarlo detalladamente se utilizaron distintas técnicas de inspección no destructivas.

Una vez caracterizada la falla, que tenía más de 6 mts. de longitud, se aplicó la técnica de *Fitness For Service* según API 579 Nivel 2 (el nivel 1 requería la reparación del caño) y de la cual se desprendía que, si bien el caño era apto para seguir operando, requería de inspecciones periódicas.

Ante esta situación se resolvió realizar una reparación en frío utilizando un material de matriz compuesta para dar una solución definitiva al problema.

Teniendo en cuenta que en la solución de este trabajo se aplicaron técnicas novedosas (al menos para la empresa) de inspección y reparación consideramos importante compartir todo el proceso, desde la inspección hasta la reparación final y las tomas de decisiones involucradas.

1. Introducción

Camuzzi cuenta con más de 8.000 kilómetros de cañerías de transmisión. Dentro de ellas, está la Alimentación a La Plata, cañería de 36km de largo, 24in de diámetro e instalada en 1963. De su operación depende el suministro de gas a más de 300.000 usuarios y constituye uno de los principales activos de la compañía.

En 2010 el Ente Nacional Regulador del Gas [ENARGAS] publicó la Adenda 1 de NAG-100, sobre el Gerenciamiento de la Integridad de las líneas de transmisión. Dentro de sus exigencias se encuentra la implementación de un Plan de Integridad de las líneas de transmisión. Dentro de esta categoría ubicamos a la Alimentación a La Plata, ya que opera usualmente a su Máxima Presión Admisible de Operación (MAPO) de 22kg/cm², lo cual supera el 20% de la Tensión de Fluencia Mínima Especificada (TFME) del material de construcción. Debido a que no es una cañería *piggeable*, se eligió asegurar su integridad por medio de la

metodología de evaluaciones directas, respetando la Sección 925 de NAG-100 y basándose en el estándar de *National Association of Corrosion Engineers* [NACE] SP0502.

Esta metodología, Evaluación Directa de Corrosión Externa (ECDE o ECDA, *External Corrosion Direct Assessment*), fue desarrollada para mejorar la seguridad de las líneas y cuyo principal objetivo es prevenir el daño por corrosión externa. Es un proceso de mejora continua que consta de cuatro pasos cíclicos:

- Preevaluación: En el primer paso se colecta toda la información histórica y presente disponible, como conformes a obra, historial de inspecciones y mantenimiento, historial y características de la protección catódica, etc. Esta información típicamente coincide con la necesaria para un análisis de riesgo (NACE SP0502, 2010, 3.2.3) Con esta información, se puede dividir las regiones con características similares y se seleccionan las herramientas de inspecciones indirectas a utilizar (NACE SP0502, 2010, 1.2.2.1).
- Inspecciones indirectas (II): En este segundo paso se realizan las inspecciones sobre el suelo, las cuales sirven para identificar fallas de revestimiento, evaluar la eficacia en la protección catódica y la corrosividad del suelo (NACE SP0502, 2010, 1.2.2.2).
- Inspecciones directas (ID): Este paso incluye el análisis de las inspecciones indirectas para la selección de los sitios de excavación. Una vez seleccionados estos lugares, las tareas incluyen la inspección directa de la cañería, reparación de defectos y revestimiento y otros ensayos localizados, como corrosividad del suelo aledaño a la cañería (NACE SP0502, 2010, 1.2.2.3).
- Posevaluación: Una vez realizado los pasos anteriores, se analiza nuevamente el estado de la línea y se recalcula los intervalos de reinspección. Los datos también son un *input* para un nuevo cálculo de riesgo (NACE SP0502, 2010, 1.2.2.4).

En 2010 se realizó una primera evaluación de riesgo comparativo de todas las líneas de transmisión de Camuzzi, de manera de establecer prioridades en la gestión de su integridad. La técnica utilizada fue la propuesta por Kiefner (1997), con adaptaciones para la aplicación en la compañía. La Alimentación a La Plata quedó ubicada en el puesto 3 de 161 del ranking de riesgo comparativo, lo que confirma analíticamente la importancia intuitiva de este activo.

Dentro del plan de inspecciones indirectas, se suelen elegir dos técnicas principales, *Close-interval Survey* (CIS) y *Direct Current Voltage Gradient* (DCVG). La primera, CIS, mide los potenciales entre la cañería y el suelo a intervalos de ~1m a lo largo de la traza y permite inferir la eficacia de la protección catódica. En la segunda, DCVG, se mide el cambio en el gradiente de potencial a lo largo de la traza y en sus alrededores, pudiéndose determinar fallas de revestimiento y la actividad corrosiva en estas zonas (NACE SP0502, 2010, 2). Asimismo, se complementan con mediciones de resistividad del terreno, pH y potenciales naturales.

La primera campaña de inspecciones indirectas se realizó a comienzos de 2012. Con estos resultados, se eligieron dos ubicaciones para realizar inspecciones directas, las cuales se efectuaron hacia fines del mismo año. Si bien se descubrieron fallas de revestimiento, la cañería no mostraba signos de corrosión.

Las frecuencias máximas de reinspección son determinadas por la tabla de la sección 939 de NAG-100. En este sentido, para la cañería bajo análisis, corresponde volver a evaluar la cañería en 10 años (2022), con inspecciones confirmatorias al año 7 (2019).

Debido a la evolución demográfica, el entorno donde están instaladas las cañerías cambia. Por lo general, en las zonas urbanas y suburbanas, suelen modificarse las clases de trazado (densidad poblacional). También suelen pavimentarse calles y caminos.

Debido a esto último, la técnica DCVG no puede aplicarse con efectividad en zonas pavimentadas. En este sentido, Camuzzi evaluó distintas alternativas. Una de ellas fue la técnica Memoria Magnética de Metal (MMM, también en inglés *Metal Magnetic Memory testing*) también llamada *Large Standoff Magnetometry* (LSM). Esta técnica es innovadora, no sólo por su desarrollo relativamente reciente, sino también por estar poco difundida a nivel

nacional. Uno de los proveedores de Camuzzi ofreció realizarla y se contrataron unos dos kilómetros en una zona seleccionada, a modo de prueba. Las mediciones se realizaron a principios de 2020.

Dentro del plan de integridad, también se realizaron inspecciones indirectas (CIS, DCVG, resistividad, etc.) en 2021 e inspecciones confirmatorias directas (ECD) en 2019 y 2020, donde no se evidenció corrosión.

2. Desarrollo

A lo largo de este trabajo se describirán las distintas técnicas de inspección, evaluación y reparación, que han sido consideradas a raíz de los hallazgos encontrados. La secuencia de pasos seguidos no responde a una yuxtaposición de acciones que se deducen de las acciones previas, donde se va eligiendo la alternativa óptima en cada etapa. Por el contrario, en la intrincada trama de información, presiones, urgencias, riesgos, limitaciones económicas, técnicas y temporales, el cable conector entre las distintas etapas es el proceso decisorio bajo incertidumbre. El modelo que se utiliza para explicar este proceso es el de racionalidad acotada. Se tienen en cuenta las herramientas decisorias de Error tipo I, error tipo 2, identificación y externalización.

Para facilitar la presentación del trabajo, se presentan cinco etapas diferentes: La primera, involucra la inspección indirecta con MMM y la evaluación directa con técnicas convencionales; La segunda, comprende la caracterización con técnicas avanzadas de ultrasonido (*phased-array*), radiografía y ensayos de materiales; La tercera, la aptitud para el servicio (FFS, *Fitness for Service*) y la ampliación del estudio MMM; La cuarta, una nueva evaluación con técnicas avanzadas y la reparación; La quinta, de verificación con MMM en dos sectores puntuales. Por último, las conclusiones y una reflexión de lo aprendido.

A modo de guía, en la Figura 1 se muestra una línea de tiempo esquemática con los hitos más importante y en la Figura 2 un diagrama de las distintas etapas.

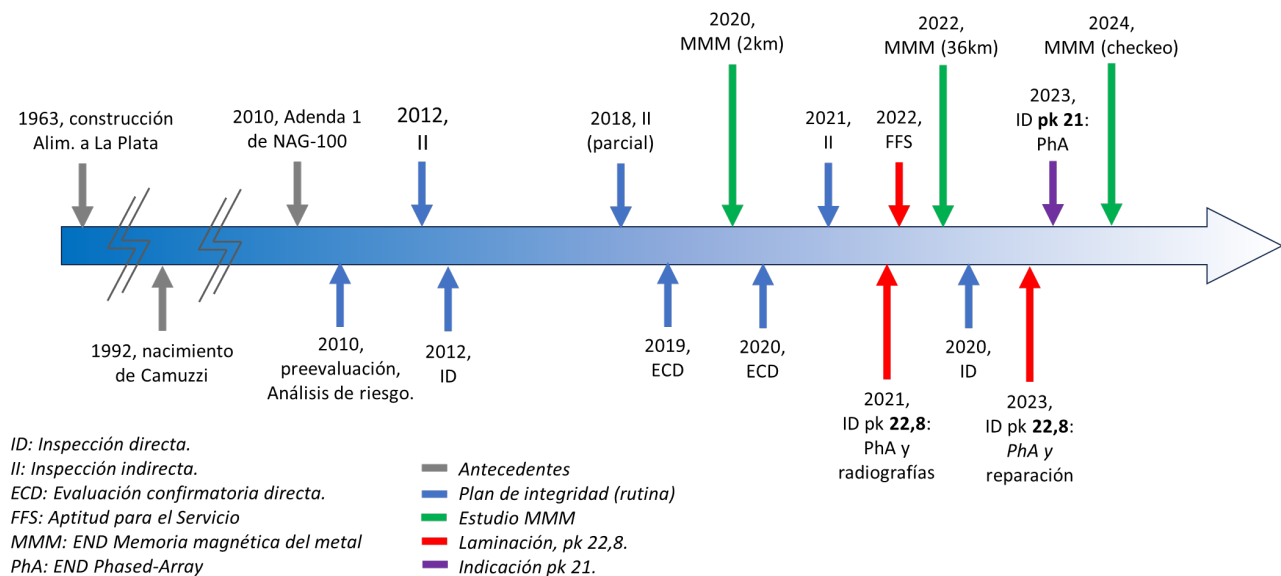


Figura 1: Línea temporal de las actividades.

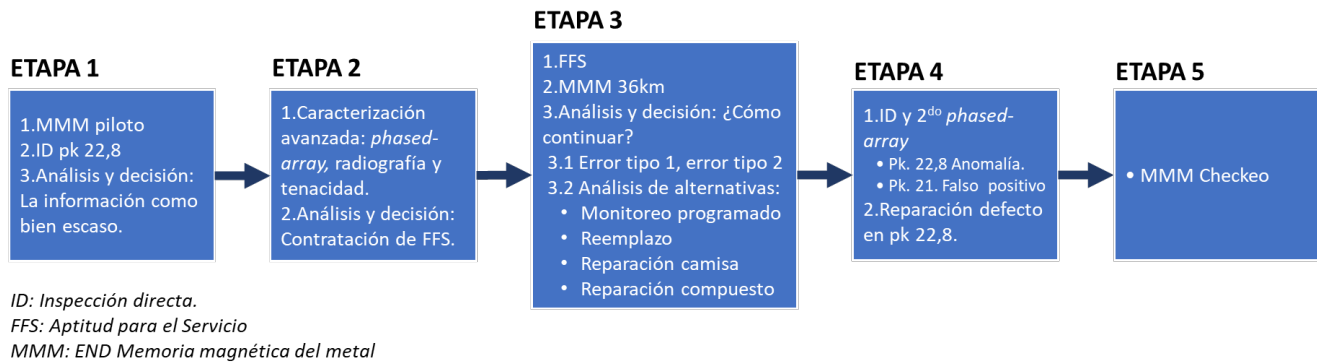


Figura 2: Etapas del caso en estudio.

2.1 Primera Etapa.

2.1.1 Inspección con la técnica Memoria Magnética de Metal (MMM)

La MMM es una técnica de Ensayo No Destructivo (END) que se basa en la medición y análisis de la distribución del campo magnético de metales ferromagnéticos. Fue propuesta en 1997 por Doubov con el objetivo de detectar concentradores de tensión relacionado a defectos en estructuras enterradas. Se base en el efecto Villari o magnetoestrictivo inverso: En los materiales ferromagnéticos, como la fase ferrítica (α) del acero, las tensiones mecánicas (presentes o pasadas) alteran los dominios magnéticos del material, ocasionando a nivel macro una distribución particular del campo magnético (IGP, 2022).

Las fuentes que podrían ocasionar distorsiones en el campo son medidas en el ensayo y pueden deberse a (ISO-24497-1,2020, 5.5):

- Factores geométricos y presencia de accesorios (codos, válvulas, etc.).
- Gradientes de tensiones, como las producidas por concentradores de tensión, como *pitting* o fisuras, o movimientos de suelo, entre otros.
- Deformaciones plásticas, especialmente las localizadas.
- Cambios en la microestructura (como en la concentración de fase gamma retenida en la soldadura de ciertos aceros).
- Campos magnéticos externos directos o inducidos.
- Cambios de temperatura.

Durante el ensayo también pueden registrarse alteraciones del campo producidos por cuestiones ajenas a la estructura, como el pasaje de camiones o tropezones del operador, las cuales, cuando acontecen, son anotadas para evitar falsos positivos.

En la inspección, se camina sobre el eje del ducto y se registra con un sensor cada ~10cm las fluctuaciones del campo magnético. Los equipos utilizados cuentan con 3 a 6 canales de medición, que miden campos entre 0 y 4.000A/m, con un error del 1%. Dos operadores adicionales miden tapada y georreferencian la trayectoria. Con los datos registrados, se realiza un procesamiento en oficina, que luego se traduce en un informe donde se muestran las ubicaciones, largos de las indicaciones y el grado de sollicitación del material, expresado como porcentaje de TFME (detección entre el 20 y el 80% de TFME).



Figura 3: Relevamiento de MMM. De derecha a izquierda, operarios efectúan (1) ubicación del ramal y medición de tapada, (2) georreferenciación (GPS) y (3) medición de campo magnético. (IGP, 2022)

En los dos kilómetros que se realizó la inspección se detectaron 131 fallas, clasificadas como (IGP, 2020):

- 94 leves, entre 20 y 44% de %TFME.
- 36 moderadas, entre 45 y 59% de TFME
- 1 severa, entre 60 y 80% TFME, con una longitud de 8,7m en la progresiva kilométrica (pk) 22,8.

2.1.2 Inspección directa en pk 22,8

Se decidió realizar un pozo en la pk 22,8, sitio de la falla severa. La dificultad en las contrataciones en pandemia y, debido a esto, los trabajos reprogramados acumulados, obligó a planificar el pozo para fines de 2021. Es importante destacar que las intervenciones directas en los gasoductos, por cuestiones de seguridad, implican operar a presiones inferiores de las habituales. Para este caso particular, se aplicó el criterio de *American Society of Mechanical Engineers* [ASME] B31.8 en su sección 851.4.b, de disminuir la presión al menos un 20% de la operativa. En la época fría del año, es particularmente difícil, cuando no imposible, disminuir la presión sin comprometer el suministro. Es por esto que los trabajos se suelen planificar para la época cálida.

La ubicación del pozo se halla en un barrio de casas bajas, cerca del cruce del Arroyo El Gato, con clase de trazado 3. Para el sector a catear, dentro de la zona de impacto se encuentran unas 14 casas, ubicándose la más cercana a 30m. El radio de impacto es de 90m, siguiendo el cálculo propuesto por ASME B 31.8S, 3.2.1.

Por lo general, ante fallas puntuales de rotura de revestimiento (DCVG), las inspecciones directas de la compañía suelen implicar un pozo típico de 3m de largo, unos 1,5 de ancho y una profundidad de 1,2m (5-6m³ de tierra removida). El espacio a los costados y debajo de la cañería tienen relación con el trabajo cómodo y seguro de los inspectores y de los encargados del *recoating*. Sin embargo, para este caso, al tratarse de una falla de mayores dimensiones y un caño de 24in, con una profundidad de tapada de 3 a 3,5m por el cruce cercano con un arroyo, se planificó un pozo de dimensiones 7m x 2,5m y una profundidad de 3,5-4m, requiriendo un movimiento de tierra de 70m³. La complejidad aumenta en pozos con profundidad mayores a 1,2m, en donde se debe utilizar tablestacas para evitar el riesgo de desmoronamiento.

El recubrimiento del ramal es de tipo asfáltico. Es habitual que, durante las tareas de movimientos de terreno en las inmediaciones, este tipo de revestimiento se desprenda o se rompa en sectores, por lo que es difícil de determinar el verdadero estado de protección que ofrece. En este sentido, se detectaron varias fallas de revestimiento en el tramo descubierto.

Una vez removido el revestimiento se procedió a la inspección visual. No se encontraron defectos superficiales como corrosión, fisuras o ampollados. Solamente se visualizaron algunas *hairlines*, producto de la fabricación típica de estos caños.

La medición de espesores planificada era con ultrasonido normal tipo *spot*, con una grilla de 240mm (cada 45° en el sentido circunferencial) por 200mm (sentido longitudinal). El resultado de esta inspección reveló una supuesta “disminución del espesor” del orden de 3.3mm (50%), como se puede observar en la Figura 4. Se amplió el pozo 1,5m a cada lado para descubrir las soldaduras circunferenciales (movimiento adicional de 30m³). Las dimensiones del defecto se estimaron en 0,15m de ancho por 2,8m de longitud, entre las 7.30 y las 9.00hs. El espesor promedio de la cañería sana era 6.5mm. También se podía visualizar que el caño está soldado a otro de mayor espesor (8,7mm) e incluso un diámetro levemente mayor. (SCH Geogas, 2021).

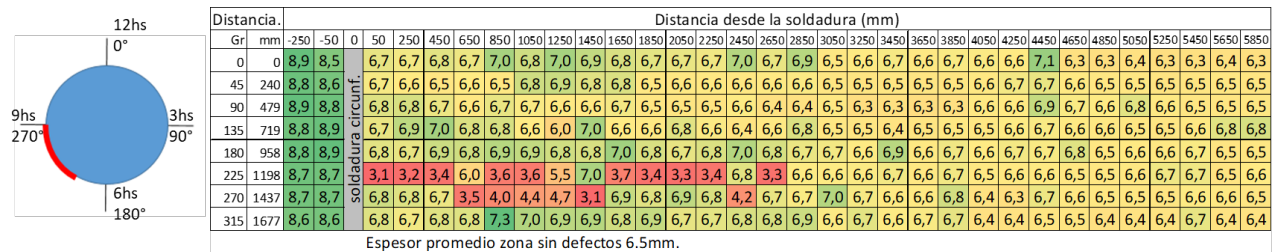


Figura 4: Mediciones de espesores spot. Adaptado de SCH Geogas (2021).

2.1.3 Análisis y decisión: La información como bien escaso.

Ante este escenario, poco habitual para la compañía en donde se evidencie pérdida de espesor sin rastros de corrosión interna, y con la información expuesta, el área técnica de la distribuidora analizó la situación. Debido a que el fluido es gas natural en especificación y con registros confiables, al menos desde que Camuzzi se hizo cargo de la concesión, se consideró poco probable la corrosión interna como causante de la falla. Al tratarse de un tramo recto, lejos de perturbaciones como codos y puntos de inyección, también se consideró poco probable la erosión como mecanismo activo. Se pensó que el defecto podría deberse a un defecto planar. Con esta hipótesis, se plantearon distintas alternativas.

- Opción 1: Quedarse con la información de la inspección realizada, tapar el pozo, analizar la situación y planificar el curso de acción.
- Opción 2: Reemplazar el tramo.
- Opción 3: Emplear algún otro método de caracterización. Con mayor información, analizar nuevamente la situación y actuar.

Otras líneas de acción, como la reparación con camisa de refuerzo o refuerzo con material compuesto, como se proponen en la Etapa 3, fueron descartadas por considerarse riesgosas. El riesgo aquí asociado no se debe a un cálculo de probabilidades de ocurrencia y consecuencias de eventos futuros al realizar tal o cual tarea, sino a intervenir el caño sin saber muy bien qué se está haciendo, ya que la información es escasa y, por tanto, el análisis limitado (esta forma de interpretar el riesgo es propuesta por el reconocido inversor Benjamin Graham). Bajo el mismo razonamiento, también se descartó la Opción 1.

La Opción 2, reemplazo del tramo, de mínima implica la doble obturación del caño donde se encontró el defecto (~10m) y soldadura a tope del tramo reemplazado. De máxima, el reemplazo de toda la línea (36km). Considerándose la obra mínima, para una obra planificada de estas características, con llamado a licitación, los costos son de unos USD400.000, sin considerar los costos internos por el operativo (horas extras, guardias, movilizaciones, etc.). En caso de una emergencia, los costos pueden aumentar considerablemente. Adicionalmente, se suman tiempos de fabricación de las monturas y el caño, que deben realizarse a medida con chapa rolada, ya que el diámetro no es estándar.

Se estimó que el defecto se encontraba allí hace tiempo. En este sentido, se consideró al defecto en las condiciones de operación actuales (22kg/cm^2) como muy probablemente estable en el corto plazo, lo que da a lugar a la posibilidad de realizar otros END para caracterizar con mayor precisión el defecto, el recurso escaso es la información.

Por tanto, se decantó por la Opción 3, caracterizar con mayor precisión la anomalía. Se decidió contratar un servicio de ultrasonido *phased-array* con ángulo normal. Si bien este tipo de estudios lleva un tiempo disponible en el mercado, era la primera vez que la distribuidora contrataba este tipo de servicio, por lo era una técnica novedosa. También se realizaron ensayos radiográficos de las juntas circunferenciales. El costo de estas inspecciones era muy inferior al del reemplazo del tramo y los tiempos quedaban acotados a algunos pocos días.

Complementariamente, dada la antigüedad de la cañería y aprovechando que se contaban con dos cupones obtenidos de derivaciones (*hot-tap*), en pk 23,6 y 33,5, en 2014 se habían realizado ensayos químicos y de tracción, dando por resultado un material compatible con API 5L Gr. B (Labtesa, 2014). En esta nueva oportunidad, y contando con dos cupones análogos de pk 29,8 guardados oportunamente, se decidió realizar otros ensayos: Químico, de tracción, dureza, metalográficos y, especialmente, flexión por impacto, para tener información sobre la tenacidad. Se descartó realizar ensayos de indentación instrumentada en el tramo del caño con el defecto, que correlaciona con la curva de tensión-deformación de un ensayo de tracción, por (1) no aportar información de la tenacidad del material y (2) para no sumar inestabilidades adicionales al caño.

2.2 Segunda etapa

2.2.1 Caracterización avanzada: Ultrasonido *phased-array*, radiografía y ensayos de materiales.

La Empresa 1 de END realizó ensayos de ultrasonido *phased-array*, con ángulo normal, transductor de 35mm de ancho y barrido de 30mm/s, y radiografías de las soldaduras circunferenciales. Los resultados del estudio son los siguientes (ServiEND, 2021):

- El defecto presenta una extensión de 6.735mm de largo y 320mm de ancho. Comienza en la soldadura circunferencial y está alejado al menos 800mm de la soldadura longitudinal (Figura 3). La distancia medida entre la cara externa del caño y la laminación es de 2,9-3,1mm, congruente con las mediciones *spot*. El espesor promedio de la cañería sana es de 6.5mm.
- El defecto es paralelo a la pared, ubicada aproximadamente a mitad del espesor, de manera relativamente continua. No se evidencia, en la cara interior de la cañería, falta de material.
- En ciertas zonas, la laminación se vuelve intermitente. Tampoco se evidencia falta de material.
- De los ensayos de gammagrafía realizados en la soldadura circunferencial se deduce que no hay fisuras y que la junta cumple con los criterios de aceptación de API 1104 Ed. 2021.

Los nuevos ensayos de materiales fueron realizados por un laboratorio especializado y dieron como resultado un material compatible con API 5L Gr. B. Los ensayos de flexión por impacto se hicieron según ASTM E 23, con medidas de probeta 5x10x55mm y entalla Charpy “V” a 0°C. Los resultados dieron un valor promedio de 18J (Labtesa, 2022).

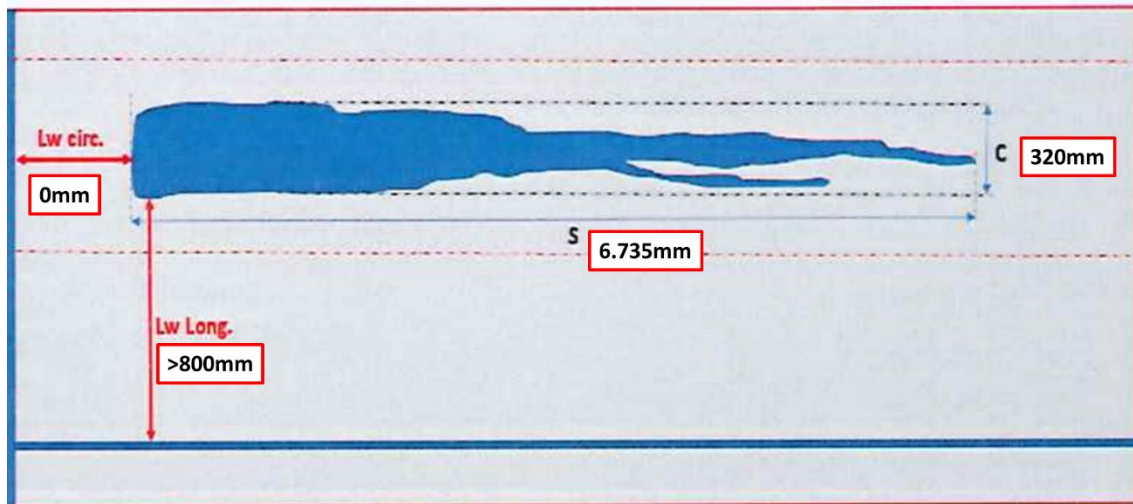


Figura 3: Esquema del defecto encontrado por la Empresa 1 de END. (ServiEND, 2021).

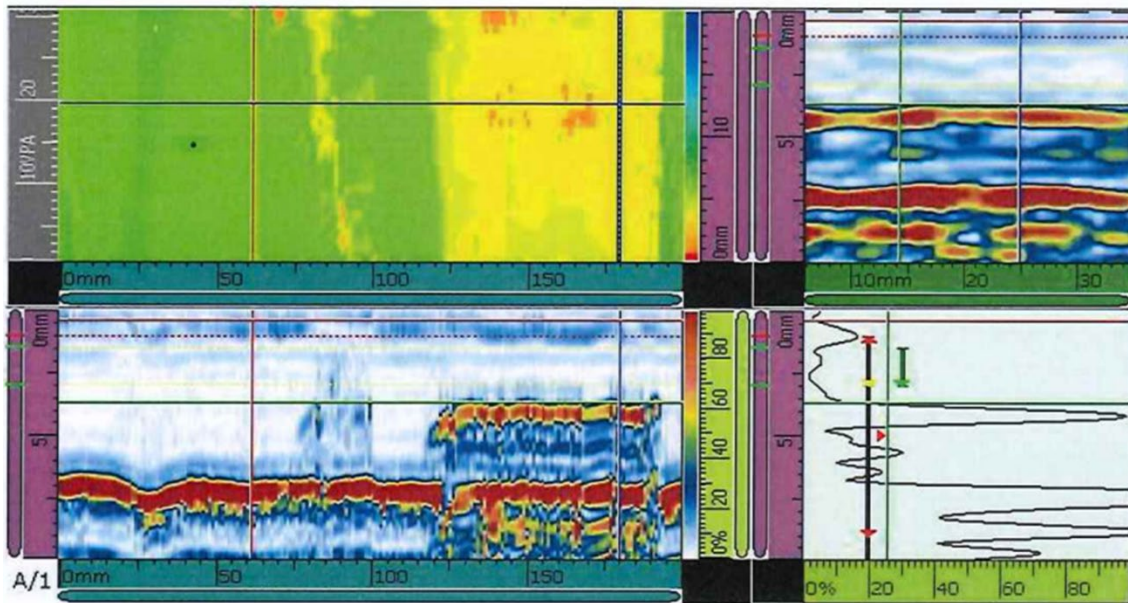


Figura 4: Ejemplo de (arriba) pasada de transductor de 35mm en sentido circunferencial y (abajo) corte circunferencial. (ServiEND, 2021).

2.2.2 Análisis y decisión: Contratación de FFS.

Con los informes de la caracterización avanzada, el sector técnico de la distribuidora analizó nuevamente la situación. Las primeras observaciones que surgen son que (1) el tamaño del defecto es mayor al medido de manera *spot*, especialmente en el largo (6.7m vs. 2,8m), y que (2) el defecto sería compatible con una laminación. Los ensayos radiográficos, si bien fueron realizados en las soldaduras circunferenciales, muestran ausencia de fisuras. Los ensayos de materiales de los cupones extraídos revelan un material compatible con un API 5L Gr. B y una tenacidad razonable.

Si bien los defectos de fabricación, como las laminaciones, son independientes del tiempo, es posible que haya adicionalmente algún mecanismo de daño desconocido que pueda provocar un crecimiento de la laminación y/o interactúe de manera negativa, desde la óptica de la integridad, con la anomalía principal. La pregunta clave es

cuán estable o inestable es el defecto y con qué margen de seguridad se cuenta. Es decir, si bien, al momento del ensayo el defecto a la presión de operación es estable, una perturbación o incluso el aumento del tamaño del defecto puede volverlo inestable y producir una falla (pérdida de contención del gas).

A este punto, la restricción operativa es el proceso decisorio. La información, tanto del ducto como especialmente de la bibliografía disponible, es mayor a la capacidad de procesamiento. Si se contase con recursos ilimitados de cómputo y análisis, se podrían evaluar los datos de los informes a la luz de la abundante bibliografía, que incluye estándares, códigos, *papers*, informes, investigaciones, nuevos materiales, procedimientos, etc. para evaluar los riesgos, costos y beneficios de todas las alternativas posibles. Con esto se elegiría la alternativa, o los medios, que mejor responde al objetivo principal que es, en definitiva, garantizar el suministro sustentable de gas al menor costo. Este modelo se conoce como modelo de decisión racional (Yacuzzi, 2007).

Pero debido a las capacidades limitadas de análisis y de atención, los decisores se ven obligados a elegir caminos más cortos y simples. A expensas de la eficiencia, se resigna la alternativa óptima por otras subóptimas que cumplan con un nivel aceptable de conformidad. A medida que se disminuye la exactitud del análisis aumenta la incertidumbre, por lo que es fundamental establecer prioridades y definir con la mayor precisión posible los intereses.

Sumado a esto, como las decisiones las toman las personas, el elemento psicológico es insoslayable. Para elegir la mejor alternativa que se le presenta ante la ya reducida mesa de opciones, el buen decisor intenta mantenerse alejado de ciertas tendencias psicológicas que pueden ser nocivas para un adecuado juicio de la situación, como la superadversión a las pérdidas (o al riesgo), a la mala influencia del estrés, al sobreoptimismo, a evitar las dudas, entre otras (Munger, 2023).

A este nivel, hay que sumarle una capa de complejidad adicional asociada a las recomendaciones, pedidos y presiones de los distintos actores internos de la compañía, que, si bien comparten el objetivo principal, los objetivos secundarios divergen: el área de finanzas procura gastar lo menos posible, la de operaciones no poner en riesgo el suministro, la de medio ambiente minimizar el venteo de gas, etc. Debido a estas influencias interpersonales inevitables, las habilidades de comunicación y negociación del decisor juegan un papel relevante, aunque escapan al análisis del presente trabajo.

Una de las herramientas para neutralizar estos factores, al menos parcialmente, es la externalización del análisis. Por un lado, se logra contar con una fuente de procesamiento adicional y, por otro lado, una mirada ajena e imparcial de la situación. En esta línea, la distribuidora contrató un servicio de Aptitud para el Servicio (FFS, *Fitness for Service*) a una empresa especializada, GIE Group, con amplia trayectoria en el rubro para analizar el estado de situación del ramal. Este estudio insumió unos dos meses de análisis, riesgo aceptable, siguiendo un razonamiento análogo al de la sección 2.1.3. Complementariamente, el sector técnico de la distribuidora recomendó tapar el pozo y extender el estudio de MMM a toda la cañería.

2.3 Tercera Etapa

2.3.1 Aptitud para el Servicio (FFS)

Camuzzi contrató un servicio de FFS siguiendo el código *American Petroleum Institute* [API] 579 / ASME FFS-1 (2016).

Las hipótesis del análisis fueron las siguientes (GIE Group, 2022):

- El ducto fue diseñado y construido de acuerdo a los lineamientos de un código como ASME B31.8 o equivalente.
- De acuerdo a los ensayos mecánicos realizados, se asume que el material del caño tiene las propiedades de API 5L Gr. B y que verifica el criterio de tenacidad.

- La caracterización de la anomalía corresponde a un defecto tipo laminación, paralela a las paredes del caño. Si bien existen registros de *phased-array* que crea una duda sobre la morfología en sectores puntuales, no se observan ampollas ni defectos volumétricos.
- Servicio cíclico: “De acuerdo con API 579 Parte 14 (Fatiga), un ciclo significativo de presión es cuando existe una variación del 20% de la presión de diseño. En el caso del ducto en evaluación, la presión de diseño es de 22,5 kg/cm², por lo que se considerará una variación máxima de 4,58 kg/cm²”. Del registro de presiones de los últimos 12 meses, se deduce que todas las presiones se encuentran dentro de este rango.
- La ovalización del caño no genera tensiones adicionales significativas.

Teniendo en cuenta lo antes dicho, se realizó una evaluación siguiendo la parte 13, Laminaciones, del mencionado código. Las conclusiones son las siguientes (GIE Group, 2022):

- El nivel 1 de FFS muestra que no cumple, ya que la distancia entre el borde de la laminación y la soldadura circunferencial es menor a 25mm, según el paso 6.3.
- El nivel 2, requiere que no se observen fisuras en el espesor del material ni indicios de fisuras hacia el lado interno y externo de la cañería. Esto se cumple, ya que “se contemplan los resultados de las placas radiográficas realizadas sobre las uniones soldadas en las cuales no se detectaron fallas y/o defectos relevantes. Adicionalmente, no se detectaron visualmente durante la inspección la presencia de fisuras o colonia de fisuras”. Por lo que el equipo es Apto para seguir operando a la MAPO.

El origen de la anomalía merece una discusión especial:

- Laminación de fabricación: “Es un plano de no fusión en el interior de una placa de acero que resulta del proceso de fabricación del acero. [...] Las mismas no causan abultamiento del metal ni tampoco fisuras en dirección del espesor.” (GIE Group, 2022). “Estos defectos tienen su origen, unas veces, en el lingote de partida, otras, se producen en los trenes de laminación y, las menos, en el tratamiento térmico final” (Naumann en Gutiérrez, 1995). Estas laminaciones son paralelas a la superficie en contraste con las escamas, que pueden no ser planamente paralelas. Las escamas tienen su origen en la colada del acero y que después del proceso de laminado se parece a “un gotón de metal adherido a la superficie, aplastado y estirado, que incluso llega a desprenderse parcial o totalmente” (Gasillón et al., 2018). Acá se podría involucrar también otros defectos de fabricación, como rugosidad interna excesiva.
- Fisuración inducida por hidrógeno (HIC, *hydrogen-induced cracking*): En este mecanismo de daño, en la superficie del metal, los átomos de hidrógenos causados por reacciones químicas ingresan al metal, difunden y se recombinan (H₂) y concentran en trampas, tales como inclusiones y laminaciones, aumentando la presión localmente y propagando fisuras. Si lo hacen cerca de la superficie, se manifiestan como ampollas (*blistering*) mientras que en el interior lo hacen como fisuras paralelas a la pared, tanto planas como en escalones unidos (*stepwise cracking*). El ácido sulfhídrico (H₂S) evita la reacción de recombinación de átomos de hidrógenos en la superficie, provocando un aumento en la absorción (API 571, 2020, 3.67). La empresa especializada sostiene que, al tratarse de un fluido en especificación, se considera que no existe presencia de agua y H₂S (GIE Group, 2022). Sin embargo, la fuente de hidrógeno podría ser externa, tanto por bacterias sulfatorreductoras del suelo (cercano al arroyo) como por la protección catódica.
- Fragilización por hidrógeno (HE y SSC, *Hydrogen Embrittlement* y *Sulfide Stress Cracking*, respectivamente): A diferencia del HIC, este mecanismo requiere de tensiones para propagarse (aplicadas o residuales) y una microestructura con fases duras, como las presente en aceros resistentes en la zona afectada por el calor (ZAC). Se habla de SSC cuando la fuente de hidrógeno es la reducción de protones que acompaña la corrosión del metal con H₂S, pero se han reportado casos en la industria del gas donde la fuente es la protección catódica y el daño ocurre en la ZAC de materiales no tan resistentes como API 5L X52 (Moneta y Coniglio, 2021). El mecanismo de daño es distinto a HIC y SOHIC, pero aún está bajo debate, existiendo unos seis modelos distintos propuestos. Es un daño que no es fácilmente detectable por END (Kappes, 2014).

- Fisuración inducida por hidrógeno orientado por tensiones (SOHIC, *stress oriented hydrogen-induced cracking*): Es un mecanismo de daño menos frecuente que HIC y SSC. Su morfología es de pequeñas ampollas o fisuras apiladas inducidas por hidrógeno, unidas por pequeñas fisuras, y alineadas en la dirección del espesor. No hay una aceptación general respecto su mecanismo, aunque es necesario para que se manifieste altas tensiones, aplicadas o residuales, y un alto flujo de hidrógeno. La mayoría de los incidentes causados por SOHIC ocurren en soldaduras, preferentemente en las zonas blandas de la ZAC y en las soldaduras longitudinales. (Marcuzzi, 2014).
- Fisuración por fatiga: Producida por tensiones cíclicas en períodos extensos, es un mecanismo siempre a considerar en gasoductos. El daño depende de las propiedades del material, las dimensiones del/de los defecto/s original/es y las variaciones de presión. Las variaciones de presión que más acortan la vida a la fatiga son las de mayor amplitud. Camuzzi ha desarrollado un método para calcular la vida a la fatiga, a raíz de la ruptura de un ducto de características similares a la Alim. a La Plata, en cuanto a construcción, pero no similitudes del defecto, ya que no se observaron fisuras en el sentido del espesor. (López, 2020).
- Una combinación de las anteriores.

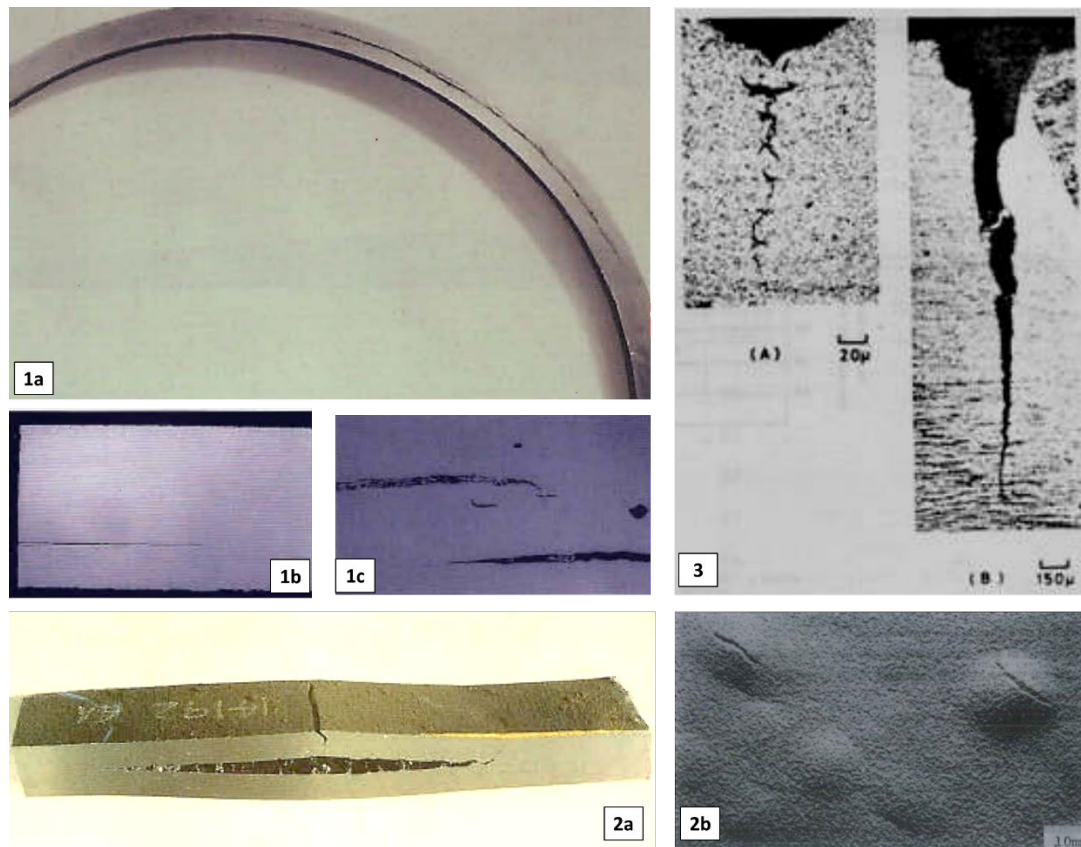


Figura 5: Defectos de distintos mecanismos de daños: (1a, b y c) laminaciones (Macaw, 2014, p.16); (2a) Daño por HIC y (2b) ampollas por HIC (Macaw, 2014, p.150); (3) izq. SOHIC y dcha. SSC (Pargeter en Marcuzzi, 2014).

A este punto, estamos ante un claro problema de identificación: Debido a que una situación puede deberse a distintas causas, es necesario considerarlas todas para el análisis. Según el listado considerado, el defecto del caño que mejor encaja con las descripciones sería la laminación de fabricación. Sin embargo, otros mecanismos como HIC, fatiga o una combinación de ellas podrían ser compatibles, al menos como agravante de la situación principal. Fisuras provocadas tanto por HE/SSC como por SOHIC no se evidencian con los END realizados, pero podrían estar latentes e interactuar con la anomalía principal. Debido a esta falta de identificación de algún mecanismo

activo que podría agravar la situación a futuro, se lo nombrará como “mecanismo de daño desconocido”. Es muy importante destacar que los mecanismos de daño propuestos dependen de las cargas estáticas o cíclicas y/o de la capacidad de absorber hidrógeno, por lo que su control o limitación podría ser una estrategia para prevenirlos.

En función de estos resultados, la empresa especializada recomendó un esquema de trabajo (Figura 6):

- Implementar un Programa de Monitoreo de la indicación por un período de 3 años con el objetivo de verificar la ausencia de fisuración de la laminación (soldadura circunferencial) o crecimiento de esta. Para esto se recomiendan las siguientes técnicas de inspección:
 - *Phased-array* con haz normal para caracterizar la extensión de la anomalía tipo laminación.
 - Placas Radiográficas en la soldadura circunferencial y en el tramo con la presencia de la anomalía para verificar la ausencia de fisuras.
 - Complementariamente se puede ejecutar ensayo de *phased-array* con haz angular para identificar la presencia de fisuras.
- Reparar el componente, siguiendo ASME PCC-2:
 - Refuerzo Tipo B (Art. 201)
 - Refuerzo de Matriz Compuesta (Art. 401), recomendándose esta sobre aquella dada la extensión de la anomalía y la proximidad a la soldadura circunferencial.
- Reemplazar el componente, siguiendo ASME B31.8 y respetando la legislación nacional.

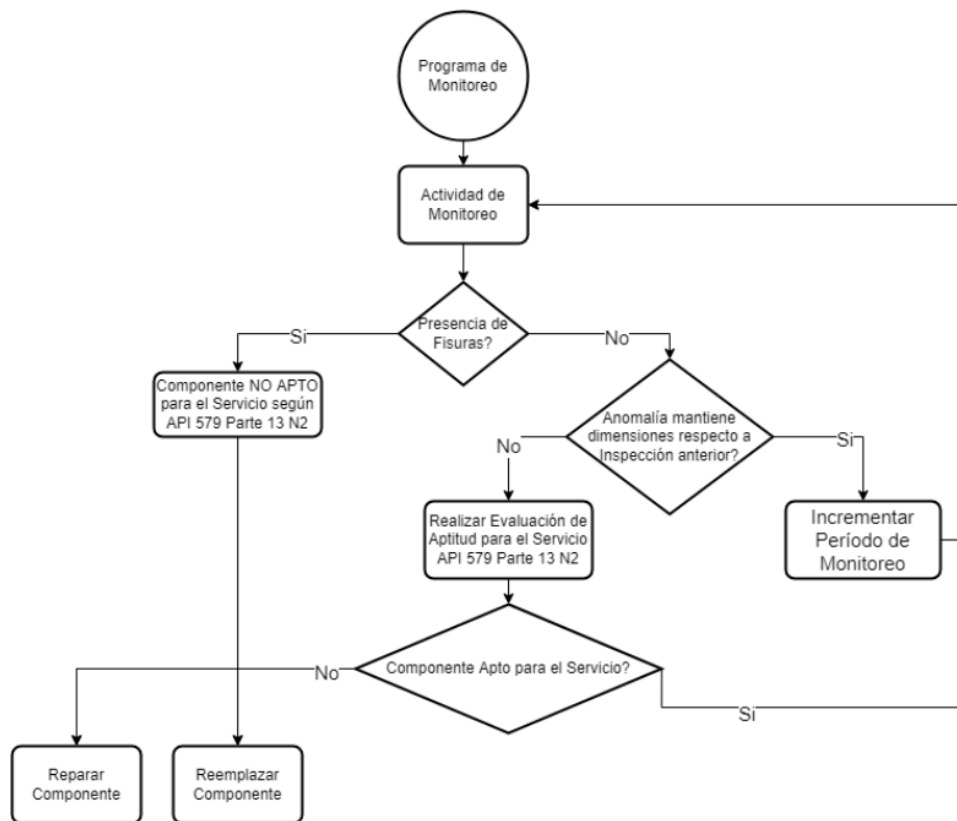


Figura 6: Esquema de trabajo recomendado por empresa especializada (GIE, 2022)

2.3.2 Resultados segundo estudio MMM (36km).

El segundo estudio de MMM se realizó en toda la traza de la cañería. Se detectaron 1.377 fallas, clasificadas como (IGP, 2022):

- 1.202 leves, entre 20 y 44% de %TFME.
- 172 moderadas, entre 45 y 59% de TFME
- 3 severas, entre 60 y 80% TFME:
 - La primera en pk 21, de 7,3m de longitud
 - La segunda en pk 22,8, coincidente con la inspección MMM de 2020, de 8,7m.
 - La tercera en pk 27, bajo asfalto, de 6,5m de longitud.

2.3.3 Análisis y decisión: ¿Cómo continuar?

El estudio de FFS esclareció cualitativamente el panorama de la situación. La primera conclusión, bajo las hipótesis planteadas, es que el ducto es apto para operar a la MAPO según un código internacionalmente reconocido.

La segunda conclusión es que, para asegurar que en el futuro la cañería pudiera continuar operando, serían necesarias acciones adicionales y que estas acciones podrían esperar un tiempo del orden de un año. En este punto siempre hay que tener en cuenta que parte del trabajo del asesor es advertir por grandes consecuencias, aunque sean poco probables, ya que, en caso de que ocurran, serán recordados (de mínima) como poco profesionales por no advertir, mientras que, de no ocurrir, el tiempo y olvido hace su trabajo. Esto nos lleva a introducir una herramienta que el decisor cuenta que es el Error tipo I, error tipo II. Existen herramientas equivalentes como ¿What if? y árboles de decisiones, pero se expone la primera por su simplicidad.

Una tercera conclusión es que la anomalía en pk 22,8 no sería la única. En el segundo estudio de MMM se relevaron otras dos indicaciones similares, tanto de orden de magnitud (%TFME) como de longitud. Asimismo, la densidad población en los alrededores de las indicaciones era similar. ¿Se deberían abordar las tres en simultáneo? ¿Se debería plantear una estrategia idéntica en todas o estrategias diferenciadas, ya que en una se cuenta con mayor información que en las otras?

2.3.3.1 Error tipo 1, error tipo 2, adaptado de De Pablo (2004).

Este esquema permite organizar los elementos relevantes para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Por ejemplo, para el caso de que nos compete, podríamos plantear el caso de actuar o no actuar, es decir, optar por monitorear, reparar, etc. o bien no hacer nada. El problema presenta dos aristas: por un lado, la decisión de actuar o no actuar; por otro lado, la necesidad del caño de que se intervenga o no.

Esto nos deja cuatro escenarios posibles:

- 1) Se decide actuar y el caño necesita intervención.
- 2) Se decide no hacer nada y el caño no necesita intervención.
- 3) Se decide actuar y el caño no necesita intervención.
- 4) Se decide no actuar y el caño sí necesita intervención.

		Se actúa?	
		Sí	No
Es necesario actuar?	Sí		Error tipo 1
	No	Error tipo 2	

Figura 7: Esquema Error tipo 1, Error tipo 2. Adaptado de De Pablo (2004)

Las situaciones 1 y 2 son diferentes (es preferible no actuar y que el caño no necesite intervención, ya que no hay gastos adicionales), pero comparten que no hay error en la decisión. En contraste, las decisiones 3 y 4 sí contienen error, porque se decide intervenir el caño cuando en realidad no es necesario o se no actúa cuando sí era necesario.

En la toma de decisiones bajo incertidumbre, entonces, hay un par de errores posibles. Está, por una parte, el error tipo I, que consiste en rechazar la hipótesis cuando en realidad ésta es verdadera, en nuestro caso, dejar el caño tal cual como está cuando es necesario actuar; y también está el error tipo II, que consiste en aceptar la hipótesis cuando en realidad ésta es falsa, en nuestro caso, realizar algún tipo de actividad cuando esta no es necesaria.

Bajo este esquema, el decisor de alguna manera sopesa la probabilidad subjetiva de cometer o no un error y también los costos y beneficios asociados con cada una de dichas probabilidades.

En este punto, quisiéramos detenernos un momento en el escenario de no actuar cuando sería necesario. A nivel compañía, las consecuencias de esta decisión podrían ser muy altas (propagación de la anomalía y ruptura catastrófica, daños en el barrio, operativo de emergencia, interrupción del suministro, quita de la concesión, etc.), altas (fuga sin ruptura, interrupción parcial del suministro, caída de la imagen de la compañía, operativo de emergencia, etc.) o moderadamente altas (fuga sin ruptura, operativo de emergencia). A nivel de los decisores, las consecuencias personales también podrían ser muy altas y las mismas se podrían ver reforzadas por ignorar el informe de FFS que recomienda actuar. Cuando las consecuencias son muy grandes, aunque las probabilidades de ocurrencia sean pequeñas, y ante ausencia de mecanismos como seguros (y reaseguros), la tendencia siempre es evitar el riesgo.

En el escenario de actuar en caso de no ser necesario, las consecuencias son más acotadas. Estarán aquí los gastos de la intervención y también el riesgo asumido, ya que la intervención podría no salir según lo planificado.

Siguiendo lo expuesto en Error tipo 1, Error tipo 2, se optó por actuar. Para definir el alcance, se analizaron en primer lugar las cuatro alternativas planteadas en las recomendaciones del estudio de FFS: Monitoreo programado, reemplazo y reparaciones con medias cañas y con material compuesto.

2.3.3.2 Análisis de alternativas

Monitoreo Programado

El monitoreo busca dos objetivos. El primero es descartar (o detectar) la presencia de fisuras en el sentido del espesor. Para esto, la evaluadora especializada propone repetir los ensayos de radiografía y complementarlos con ensayos de *phased-array* angular. La segundo es determinar si la laminación continúa creciendo en el plano y a qué velocidad.

Este último, presenta serios desafíos metodológicos. Si consideramos que los puntos iniciales y finales detectados de la laminación se marcan y se miden con cinta métrica, el error se reduce a la resolución del *phased-array* más el error de la cinta métrica. La resolución del *phased-array*, si bien es del orden de 1mm por pixel, queda a interpretación del operador donde termina y empieza la laminación, pudiendo ser el ruido similar a la señal. El error de la cinta métrica es de segundo orden (~2mm). De manera análoga sucedería con el ancho del defecto. El error de interpretación podría estar en el orden de los centímetros, como mínimo. Por lo tanto la confiabilidad de la comparación entre los ensayos realizados para caracterizar este tipo de defecto en diferentes momentos, es baja.

El costo de la obra civil es de aproximadamente USD20.000 por pozo (todos los valores expresados son por intervención) y la de los END propuestos de unos USD5.000, es decir, un total de USD25.000 por intervención. Es decir, si consideramos de mínima una inspección anual por un período de 3 años, según la recomendación de GIE Group, el monto asciende a unos USD75.000.

Reemplazo

El reemplazo de mínima, es decir del caño propiamente dicho con la laminación (10m), es una tarea frecuente para la compañía. Debido a las limitaciones del sistema para interrumpir el servicio, se podría realizar con dos obturaciones, conexión de un *bypass* y soldadura del tramo principal de 24in (Figura 8).

Lo que no es frecuente para Camuzzi, son los trabajos en estos diámetros y en cañerías tan antiguas. Un riesgo adicional a tener en cuenta es la asociada a las soldaduras longitudinales de resistencia eléctrica a baja frecuencia, utilizadas típicamente antes de los años 70' y que suelen estar asociadas a una mayor frecuencia de falla (Muhlbauer, 2004, p.98). Para el caso particular de esta cañería, con la experiencia de trabajos anteriores, las monturas y el tramo a reemplazar se deben fabricar a medida con chapa rolada, ya que el diámetro no es estándar. Sumado a esto, el defecto de ovalización podría traer dificultades adicionales.

El costo de este trabajo se podría estimar en USD 400.000.

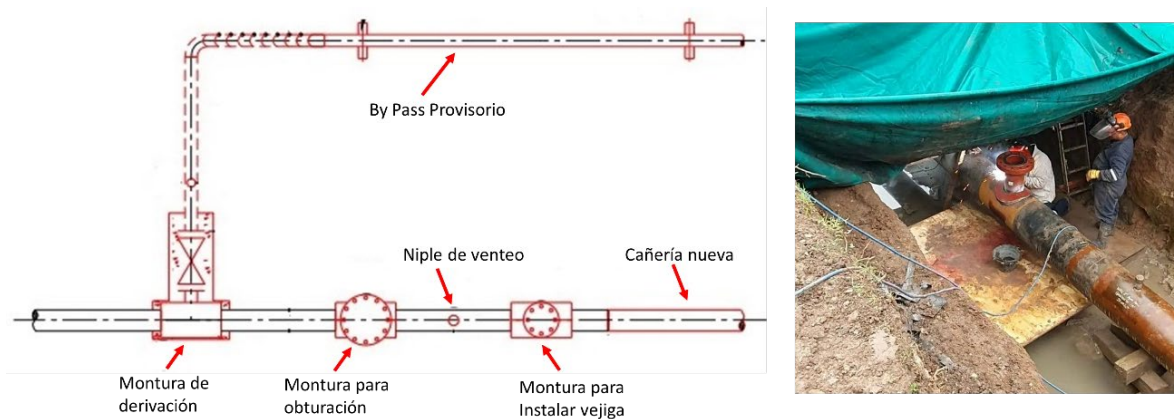


Figura 8: Izq. Esquema típico de reemplazo con bypass y dcha. soldadura de niple con refuerzo en gasoducto 8" para instalar vejiga.

Reparación con dos medias-cañas soldadas

La reparación con dos medias-cañas soldadas está cubierta en ASME PCC-2, Art. 206. Este tipo de reparación consta de dos medias-cañas que se colocan envolviendo la cañería original y se sueldan de forma longitudinal en ambas uniones. Si además se sueldan en los bordes circunferenciales, se la clasifica como Tipo B (1.1.2) y es capaz de contener presión interna. El diseño del refuerzo es tal que debería ser capaz de contener la presión en caso de una fuga del caño principal inmediato a la camisa.

Como se ha dicho anteriormente, las medias cañas se deben fabricar a medida con chapa rolada, ya que el diámetro no es estándar. Las dimensiones de cada media caña y su peso (~800kg) dificultaría sensiblemente el proyecto. Sumado a esto, el defecto de ovalización podría traer dificultades adicionales, ya que, si bien lo óptimo es un calce perfecto entre el caño y el refuerzo, se permitiría un *gap* máximo de 2,5mm (206.4.1). Asimismo, la presencia de un caño de un diámetro levemente mayor aguas abajo vs. el de aguas arriba, dificultaría las soldaduras circunferenciales.

El costo de este trabajo sería del orden de los USD 50.000.

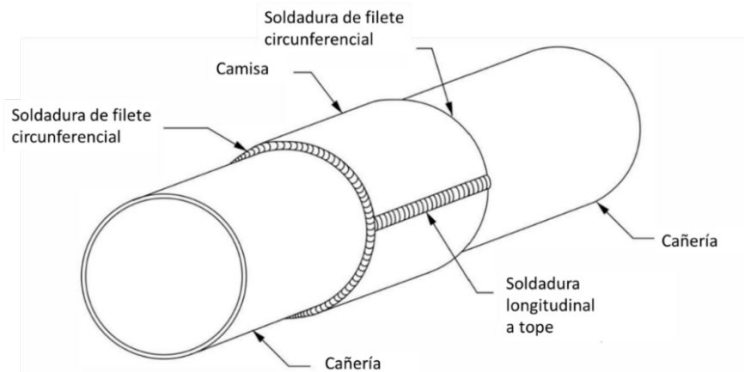


Figura 9: Refuerzo tipo B. (ASME PCC-2, 2022, Figura 206-1.1.2-1)

Reparación con refuerzo con materiales compuestos

El sistema de reparación con materiales compuestos no metálicos está contemplado en la norma ASME PCC-2 en Art. 401. Se habla de un sistema de reparación ya que consta de una combinación de 8 elementos:

1. Sustrato (reparación de la superficie)
2. Preparación de la superficie
3. Material para transferencia de cargas (*filler*)
4. Primera capa de adhesivo
5. Material compuesto
6. Método de aplicación
7. Protocolo de curado
8. Adhesivo interlaminar para sistemas que usan capas curadas.

El método es aplicable para reparación de cañerías, en particular las diseñadas bajo ASME B 31.8, tanques y recipientes sometidos a presión. Como la cañería opera a $>10\text{kg/cm}^2$ (150psi), clasifica como de alto riesgo y aplica el Art. 401 (401-1.2.2a). Los defectos que pueden repararse por este método son los típicos que se pueden encontrar en las líneas de la compañía como corrosión externa, daño externo como abolladuras y arañazos, defectos de fabricación (como laminaciones) y hasta fugas (401-1.2.3a).

Si bien ASME-PCC-2 no clasifica las reparaciones como temporarias o permanentes, hace consideraciones particulares sobre la vida útil para cada tipo (101-3.7). Para el caso de reparaciones con materiales compuestos, la vida de la reparación debe definirse por un análisis de riesgo y depende del sistema de reparación elegido, donde se deben considerar variables tales como medio ambiente, mecanismos de degradación, tipo de servicio (ej. cíclico), etc. (401-1.4).

El costo de este trabajo sería del orden de los USD50.000.

Ya explicamos en 2.2.2 que el modelo de decisión racional, donde es posible contar con los cálculos y ponderaciones de todas las alternativas posibles y elegir aquella que maximiza los beneficios o la utilidad, no es el que mejor explica el comportamiento de los decisores para un caso como el estudiado en este trabajo.

En primer lugar, el fallo está dado por la incapacidad de saber el estado real del caño o, dicho con otras palabras, conocemos de manera aproximada su estado. En ingeniería, estamos acostumbrados a trabajar con incertidumbres, producto de las limitaciones técnicas de materiales y procesos y aplicamos una herramienta, posiblemente la más relevante del mundo ingenieril, que es el margen de seguridad. Como contrapartida, márgenes de seguridad excesivos nos vuelven conservativos. Explorar sus límites es una tarea ardua pero que, de realizarse con pericia de

manera sistemática y acumulativa, da una ventaja competitiva que puede determinar el éxito de una compañía (o al menos su supervivencia, que no es poco).

Un segundo fallo, y que se alimenta del *input* del primero, es la limitación para conocer la evolución de la anomalía. Como no se conoce la historia del defecto, sólo contamos con una “foto” de la situación, extrapolar resultados podría arrojar resultados poco confiables. Esto quedará en evidencia más adelante, en la sección 2.4.1.

En tercer lugar, están las incertidumbres asociadas a la implementación de las distintas soluciones, que, de mínima, podrían disparar los costos. Un ejemplo sería si se hiciese un reemplazo, una de las monturas podría fugar, producto de tensiones adicionales subestimadas, lo que provocaría ventear parte del ramal, comprometer el suministro de gas, etc.

Por último, el estado de los otros dos sitios donde se encontraron otras anomalías con la técnica MMM, que podrían ser similares a la primera o bien de una naturaleza distinta.

Esto describe a grandes rasgos el marco de incertidumbre con el que los decisores se encontraban. Las otras capas de complejidad de la situación, ya descritas en la sección 2.2.2, complementan este cuadro. Por tanto, un modelo que se adecúa mejor a esta realidad es el de racionalidad acotada (*bounded rationality*), propuesto por Simon (Simon en De Pablo, 2004a).

La idea central de este modelo es que “debido a limitaciones en sus conocimientos y capacidad de procesamiento de la información, el ser humano busca niveles de conformidad en vez de maximizar” (Simon en De Pablo, 2004a). En otras palabras, se cambia el objetivo principal maximizador, donde el decisor sólo se conformaría con lo mejor de lo mejor posible (óptimo), por subobjetivos a satisfacer y cuya solución final sea suficientemente buena. “Quien tiene que tomar una decisión se forma una idea acerca de lo que aspira. En cuanto lo encuentra, termina la búsqueda” (Simon en De Pablo, 2004a). Para nuestro caso, algunos de los subobjetivos podrían presentarse como:

- La solución debe ser permanente o, al menos, de muy largo plazo.
- Si hay algún mecanismo activo, la solución debe frenarlo.
- La implementación de la solución no debe comprometer el suministro a los usuarios (o al menos los residenciales).
- Debe dejar conforme a los operadores, que siempre van a preferir la mejor opción técnica.
- Deben poder implementarse en plazos razonables.

La alternativa de monitoreo tiene un precio medio (USD75.000). Presenta dificultades métricas y hay un riesgo considerable de que las futuras inspecciones no sean concluyentes y se requieran, a futuro, nuevas inspecciones periódicas, lo que incrementaría significativamente los costos. Asimismo, las indicaciones de pk 21 y 27 no tienen una línea base para comparar, ya que no han sido cateadas.

La alternativa de reemplazo es permanente y, sin dudas, pondría fin a la cuestión. En contraste, es la más costosa (USD 400.000) y, se estima, difícil de implementar debido, especialmente, a la ovalización del caño y la diferencia de diámetros. También hay un riesgo asociado de fuga durante la reparación por tratarse de una cañería de más de 60 años y construida con los estándares de la época. Esto implicaría, ante la imposibilidad de maniobra del sistema, un riesgo de falta de suministro temporal a los usuarios.

La alternativa de reparación con camisa de refuerzo soldada comparte las observaciones de la anterior y se suman las dificultades de manejo y calce de las medias cañas, difíciles de estimar. A diferencia del reemplazo, es más económica (USD 50.000). Adicionalmente, la laminación quedaría presente debajo de la camisa, pero solicitada a tensiones mucho menores, y con la imposibilidad de ingreso de hidrógeno. Los mecanismos activos discutidos que podrían ocasionar un deterioro futuro quedarían neutralizados y, por lo tanto, sería una solución permanente.

La reparación con material compuesto tiene un costo similar al de la camisa soldada (USD50.000). Es una alternativa innovadora para la compañía, ya que sería la primera vez a utilizarse, aunque el sistema hace tiempo se

encuentra probado y disponible en el mercado. Como en el caso anterior, la laminación quedaría presente debajo del refuerzo, absorbiendo la mayoría de las solicitaciones y con una barrera al hidrógeno. Es una reparación permanente (min. >20 años). Una consideración especial merece el foco normativo: La NAG-100 ha utilizado como base el *Code of Federal Regulations* [CFR] 49, parte 192, en particular la edición de 1991, el cual ya había sido adoptado como propio por parte de Gas del Estado (NAG-100, 1993, prólogo). Para el caso de las reparaciones permanentes de líneas de transmisión que operan a $\geq 40\%$ TFME, como es el caso de la Alim. a La Plata, se sigue la sección 713. Este artículo fue actualizado en 1999 por el Departamento de Transporte del Gobierno Federal, dando como posibilidades el reemplazo (a.1) o la reparación (a.2), “reparado mediante un método que, según demuestran pruebas y análisis de ingeniería confiables, puede restaurar permanentemente la capacidad de servicio de la línea”, con la idea de flexibilizar la regulación y fomentar las innovaciones tecnológicas y reducir los costos de reparación sin disminuir la seguridad. La versión previa a 1999 solo contemplaba el reemplazo o la reparación con camisa de refuerzo.

Teniendo en cuenta lo expuesto, los decisores optaron por:

- Realizar un estudio de *phased-array* en la zona ya inspeccionada y, de no observarse nada nuevo (ej. ampollas, fisuras superficiales, etc.), reparar con material compuesto.
- El mismo esquema se haría en la segunda indicación (pk 21), dependiendo de los hallazgos. La indicación bajo asfalto (pk 27) se inspeccionaría en una etapa ulterior (ver art 2.5)
- La implementación de la solución se planificó para fines de 2023, es decir dos años después del primer pozo, debido principalmente a la dilación de los tiempos por las trabas a las importaciones de los materiales de reparación. Este plazo si bien es superior al recomendado de un año por el estudio de FFS, se consideró un riesgo aceptable.

Utilizando la analogía de Kissinger (2022), los líderes, como los acróbatas trapecistas, “pueden fallar tanto si son muy audaces como tímidos y están obligados a moverse en un estrecho margen, suspendidos entre las relativas certezas del pasado y las ambigüedades del futuro”.

2.4 Cuarta Etapa

2.4.1 Inspección directa y *phased-array*.

Inspección en pk 22,8: Anomalía.

El pozo en la ubicación de la laminación fue de dimensiones similares al efectuado en 2021. La secuencia de pasos y consideraciones también fueron similares.

La inspección visual reveló ausencia de defectos superficiales como fisuras o ampollas. Se contrató a otra empresa para realizar los ensayos de *phased-array* tipo normal (Empresa 2 de END). Los resultados fueron los siguientes (GTL, 2023):

- Las dimensiones de la anomalía fueron de 6.330mm x 270mm, comenzando desde la soldadura circunferencial. Es decir, menores a la relevada por la Empresa 1 de END (6.735mm x 320mm). Es paralela a la superficie, encontrándose aproximadamente a mitad del espesor. La diferencia en las dimensiones entre los estudios de *phased-array* confirma la hipótesis de la dificultad de monitoreo de este tipo de defectos.



Figura 10: Pozo en pk 22,8. Caños con marcas para guía del palpador de ultrasonido (GTL, 2023).

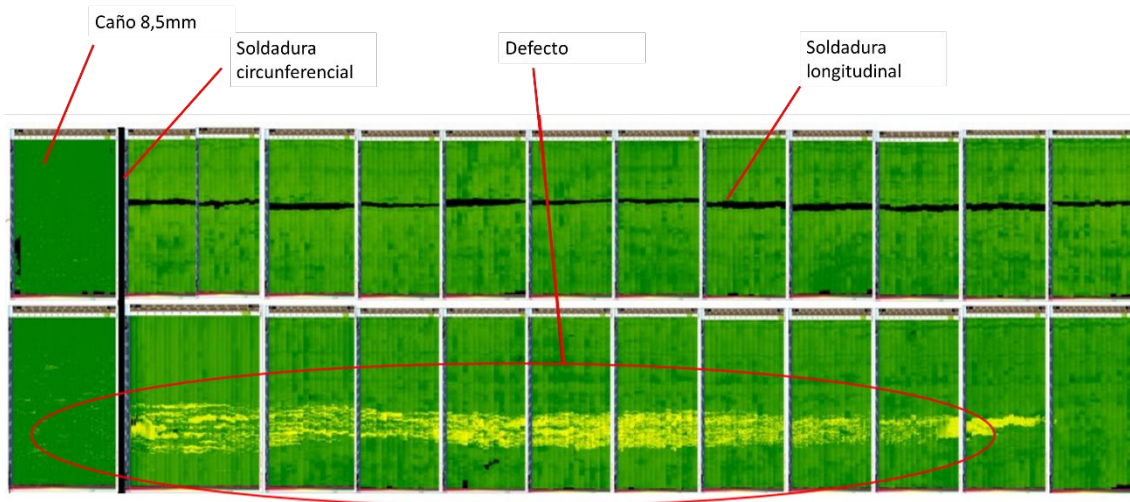


Figura 11: Anomalia según estudio de phased-array de Empresa 2 de END (GTL, 2023).

Inspección en pk 21: Falso positivo.

Para el pozo en la ubicación 2, las dimensiones finales del pozo fueron de 9m x 2,5m con una profundidad de 2,5m (60m³). La secuencia de pasos y consideraciones no se diferencian de las del pozo 1. La inspección visual reveló ausencia de defectos superficiales como fisuras o ampollas. Se descubrió una soldadura circunferencial entre dos caños, aproximadamente a mitad del pozo. La Empresa 2 de END realizó las inspecciones, con los siguientes resultados (GTL, 2023):

- Se hizo un rastreo manual con *phased-array* normal en zigzag a lo largo de ambos caños, sin encontrar indicaciones relevantes.
- Se realizó un escaneo normal en cuatro tramos, de un metro de ancho cada uno, sin encontrarse indicaciones relevantes.
- El *scan* angular realizado en la soldadura circunferencial y sectores de las soldaduras longitudinales relevaron ausencia de defectos, con excepción de la desalienación entre los caños, visible a ojo desnudo.

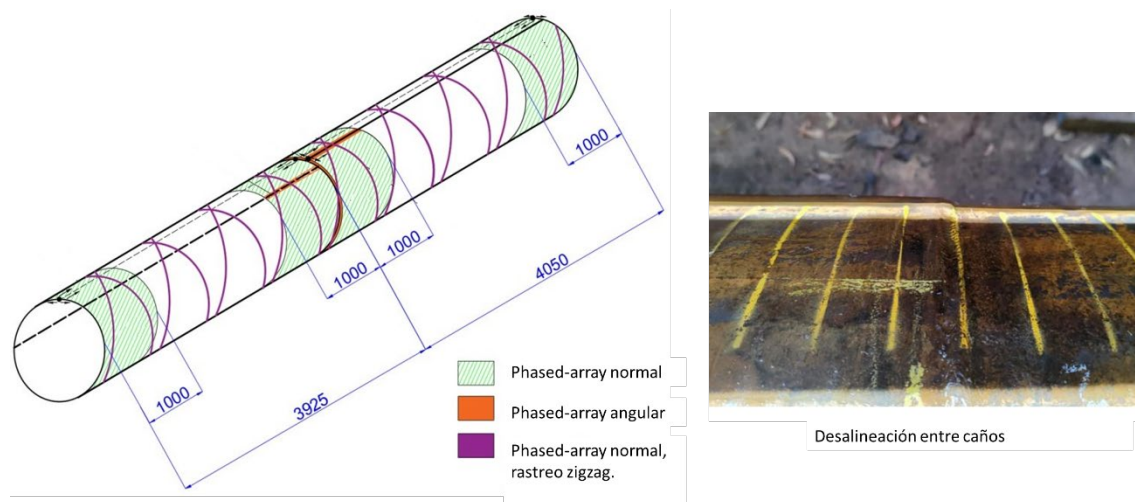


Figura 12: Izq. END en pozo 2 y dcha. desalineación entre caños. (GTL, 2023)

2.4.2 Reparación del defecto en pk 22,8

El sistema de reparación con material compuesto elegido fue el desarrollado por la firma Iridium Technologies, con sede en Texas (USA), cuyo representante y comerciante local es Morken Group. Está registrado con el nombre TitaniumWrap. La resina es de base epoxídica y el refuerzo un tejido triaxial de fibra de vidrio (TurboWrap). Cumple tanto con el CRF título 49 parte 192 (y 195) y ASME PCC-2 S. 401. Una vez curado, los residuos generados son no-peligrosos.

El refuerzo necesario está proporcionalmente relacionado al número de capas de refuerzo, variando típicamente de 4 a 8. Para el caso de la laminación, se supuso una resistencia remanente del acero base del 20%. Es decir, el refuerzo podría soportar el 80% de los esfuerzos por presión interna. Se tomó una presión de diseño de 25kg/cm^2 . El tipo de diseño es A (refuerzo solamente) (ASME PCC-2, 2022, 401-3.4.1), es decir, no se considera el contacto fluido/refuerzo, y se sigue el método de diseño propuesto en 401-3.4.3.2. Se calcularon 7 capas, con un espesor total de reparación de 11mm. El rango de temperatura de operación de la cañería es de 6 a 29°C , inferior al máximo de 60°C para el material compuesto.

Como se ha mencionado en la sección 2.3.3.2, el sistema de reparación con matriz compuesta se compone de distintos pasos. El primero, es la preparación de la superficie, por medio de arenado, con un grado de limpieza a “metal casi a blanco”, Sa 2 ½ siguiendo la norma ISO 8501-1.

Para la transferencia de cargas se utilizó *filler* compatible del mismo fabricante en un pequeño sector con una marca de fabricación o instalación, que seca en unos 15min.

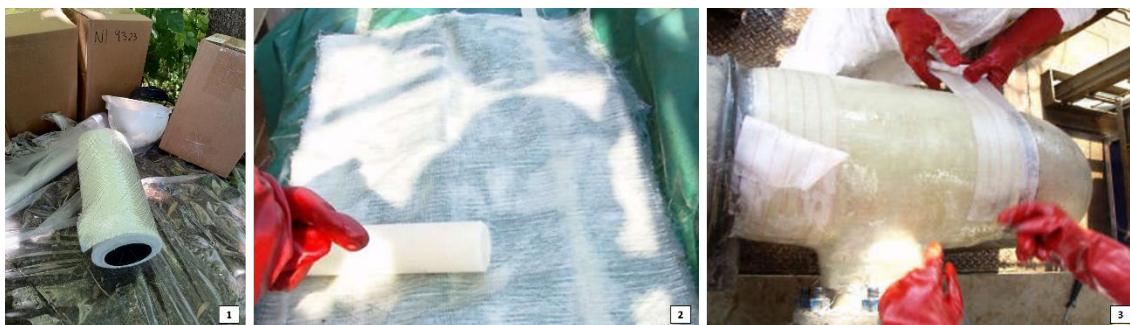


Figura 13: (1) Rollos de tejido de fibras de vidrio, (2) embebido del tejido con la resina con rodillo y (3) colocación de peel ply. (Iridium, s.f.)

La primera actividad es el corte de los rollos de tejido en una longitud del perímetro del caño más un solape de 25mm. Una vez listos, se aplicó sobre el caño una primera capa de resina para facilitar la adherencia, la cual es obtenida al mezclar dos compuestos. Seguidamente, se fueron colocando las capas sucesivas de mallas embebidas en resina, procurando evitar que queden burbujas atrapadas. Este empape se realiza mediante rodillo en una bandeja plástica. Luego, las capas son colocadas sobre el caño, solapadas tanto en el sentido longitudinal como en el circunferencial (unos 25mm de solape).

Una vez que se comienza el trabajo no es posible detenerse, debiendo continuarse hasta el final. Por las dimensiones de la reparación, fue necesaria la asistencia de seis colaboradores más el inspector, los cuales estaban debidamente calificados. Si bien el curado tarda varias horas a temperatura ambiente en ganar la resistencia mecánica calculada, la gelificación de la resina comienza aproximadamente 40min a 25°C después de mezclados los compuestos, siendo muy sensible a la temperatura (a mayores temperaturas, el tiempo se acorta). Cuando la resina gelifica, es necesario cambiar rodillos y bandejas. Asimismo, hay que usar guantes apropiados, ya que la temperatura de gelificación es de 99°C. También es necesario utilizar barbijo por las fibras de vidrio. El mameluco impermeable no responde a exigencias de seguridad sino a prevenir las manchas. El trabajo insumió unas 7 horas.

Una vez dispuestas todas las capas, se coloca una cinta compresiva (*peel ply*) para mejorar el acabado que, una vez curada la resina, se retira. Al otro día se realiza una inspección y, si está todo de acuerdo al estándar, se da por finalizada la reparación. Luego se continúa con el *recoating* normalmente.

Para la ubicación 2, al no encontrarse ningún defecto, se procedió directamente con el *recoating*.



Figura 14: (1) Colocación de primera capa de refuerzo, (2) colocación de peel ply luego de la última capa de refuerzo y (3) retiro de peel ply y acabado final.

2.5 Quinta Etapa: Checkeo con MMM

Debido a la ausencia de defectos en la ubicación de pk 21, se decidió realizar una tercera inspección con MMM a modo confirmatorio y en la tercera falla, bajo asfalto (pk 27), para definir los pasos a seguir. Este checkeo, realizado por la misma empresa que los anteriores estudios, dio como resultado fallas leves y moderadas (<50%TFME) pero ninguna severa.

La técnica MMM detecta tensiones que pueden deberse a distintos motivos, como se enumeran en 2.1.1. Dependiendo del motivo, algunas tensiones tienden a disiparse, por ej. aquellas provocadas por un golpe o por *pitting*, aproximadamente después de los doce meses. Otras tensiones pueden permanecer estables o aumentar. Con los desarrollos actuales, la técnica MMM no tiene la posibilidad de asociar las tensiones relevadas con el tipo de falla que las provoca.

Conclusiones

- Para asegurar la integridad de cañerías no *piggableables* aplicando la metodología ECDA, la técnica de Memoria Magnética de Metal (MMM) es una metodología válida en la etapa de inspecciones indirectas, en especial para sectores donde la traza de la cañería se ubica bajo asfalto. Para la selección de los sitios de inspecciones directa es necesario complementarla con otra (u otras) técnica de inspección indirecta.
- Cuando las indicaciones de MMM son extensas, es recomendable realizar inspecciones directas acotadas, a modo de muestreo, antes de proceder con un pozo de mayores dimensiones, ya que la causa de la indicación podría ser tensiones transitorias o falsos positivos.
- La técnica de ultrasonido *spot* tradicional aplicada a medición de espesores para caracterizar cañerías antiguas, con potencial presencia de defectos de fabricación y/o defectos internos, es muy limitada y el error excesivo. Es preferible realizar un barrido parcial con ultrasonido *phased-array* normal y, de encontrarse necesidad, ampliarlo.
- Es dificultoso realizar un monitoreo periódico de defectos como laminaciones con estudios de *phased-array* debido tanto a limitaciones inherentes de la técnica, como a los criterios del operador del equipo. De realizarse de esta manera, salvo grandes desviaciones muy evidentes, se podrían llegar a conclusiones equivocadas.
- Ante la imposibilidad de realizar ensayos destructivos para investigar y determinar el mecanismo de daño presente en un defecto, los ensayos no destructivos no siempre logran salvar este problema de identificación. No se puede reducir la incertidumbre respecto de afirmaciones sobre supuestos más probables y, por lo tanto, las mitigaciones propuestas en estas situaciones deben contemplar los escenarios más desfavorables.
- Los sistemas de reparación con materiales compuestos no metálicos para daños en gasoductos y ramales son una alternativa a las reparaciones soldadas tradicionales, como medias cañas y reemplazos de tramos. Respetan estándares y normativas internacionales y pueden ser utilizados para los defectos más frecuentes, tales como corrosión, daños por terceros, defectos de fabricación, como laminaciones, e incluso defectos pasantes (sin presencia de gas durante la reparación) Su implementación es económicamente competitiva y, si se cuenta con material en stock, es más rápida y sencilla que las soldadas.
- Un modelo que explica la toma de decisiones en las empresas es el de racionalidad acotada. Los decisores se ven en la necesidad de sopesar riesgos, costos y beneficios, y cuentan con herramientas como Error tipo 1, error tipo 2 para sistematizar el análisis. En contraste con el modelo de decisiones racionales, donde se busca elegir la mejor alternativa para un objetivo bien definido, en el modelo de racionalidad acotada se busca satisfacer niveles de conformidad aceptables, donde es decisivo para el éxito definir con precisión prioridades e intereses.
- La contratación de empresas externas, especialistas en análisis de aptitud para el servicio e inspecciones para sopesar la situación del activo, su contexto y el riesgo asociado contribuye a la imparcialidad del análisis.

Bibliografía

- API 579/ASME FFS-1 (2016). *Fitness-For-Service*.
- API/ANSI RP 571 (2020). *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*.
- ASME B31.8 (2022). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*.
- ASME PCC-2 (2022) *Repair of Pressure Equipment and Piping*.
- CFR (7 de mayo de 2024). Part 192.713. En *Title 49 - Transportation*. <https://www.ecfr.gov/>
- De Pablo, J. C. (2004). *La economía como proceso decisorio. Mi versión*. Universidad del CEMA.
- De Pablo, J. C. (2004a). *La economía como proceso decisorio. Reseña con ideas ajenas*. Universidad del CEMA.
- ENARGAS (1993). *NAG-100, Normas Argentinas mínimas de seguridad para el transporte y distribución de gas natural y otros gases por cañerías (GN-GL)*.
- ENARGAS (2010). *NAG-100, Adenda-, Parte O, Gerenciamiento de la integridad de líneas de transmisión*.
- Gasillón, G. et al. (2018). Una descripción de las discontinuidades planares a partir de una inspección interna con herramienta de ultrasonido recto y la detección de anomalías. *Petrotecnia*, 59(3), 72-84.
- GIE Group (2022). *Informe técnico CMZZI-PR00828-01-0D: Aptitud para el Servicio de Tramo de Ramal 24'' Gutiérrez-La Plata con Laminación*.
- GTL (2023). *Registros de ensayos por ultrasonido, GTL-CAM-UTPA-1771/93*.
- Gutiérrez de Sáiz-Solabarría, S. (1995). Diagnóstico de la defectología que de forma accidental suele presentar la laminación de tubería de altas prestaciones. *Revista Metalurgia*, 31 (1), 39-45.
- IGP (2020). *Informe Técnico: Relevamiento LSM Ramal Al. Gutiérrez – La Plata, km 22-24*.
- IGP (2022). *Informe Técnico: Relevamiento LSM Ramal Al. Gutiérrez – La Plata*.
- IGP (2023). *Informe Técnico: Relevamiento LSM Ramal Al. Gutiérrez – La Plata, km 20-21 y 27-28*.
- Iridium Technologies (s.f.). *TitaniumWrap Installation Guide and Checklist*.
- ISO 24497-1 (2020). *Non-destructive testing, Metal magnetic memory, Part 1: Vocabulary and general requirements*.
- Kappes, M. (2014). *Daño por hidrógeno en materiales metálicos* [Material de cátedra]. Instituto Sabato.
- Kiefner, J. F. (1997, 10-12 febrero). *A risk management tool for establishing budget priorities*. [Presentación en una conferencia]. Risk Assessment/Management of Regulated Pipelines, Houston, TX, United States.
- Kissinger, H. (2022). Introduction. The Nature of leadership decisions. En *Leadership. Six Studies in World Strategy*. Penguin Press.
- Labtesa (2014). *Certificado de análisis, OT 417724*.
- Labtesa (2022). *Certificado de análisis, OT 488182 y 488182/1*.
- López, D. S y Lorenzo, A. (2020). *ERW pipe rupture, fault analysis and development of a fatigue crack life assessment methodology*. [Presentación en una conferencia]. 23rd IAS Steel Conference IAS, 2020, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Macaw (2014). *Macaw's Encyclopedia of Pipelines Defects*. Clarion Technical Publishers, Tiratsoo Technical.
- Marcuzzi, A. J. (2014) *Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking – SOHIC* [Trabajo Final]. Instituto Sabato.

Moneta, A. y Coniglio, S. (2021, 31 de mayo a 2 de junio). *Gestión de la protección anticorrosiva en cañerías susceptibles a los daños por hidrógeno*. [Presentación en un congreso virtual]. 4to Congreso de Integridad y Corrosión en la Industrial del Petróleo y Gas IAPG, Argentina.

Muhlbauer, W.K. (2004). *Pipeline risk management manual*. GPP Elsevier.

Munger, C. T. (2023). Talk Eleven: The psychology of human misjudgment. En P. D Kaufman (Ed.), *Poor Charlie's almanack. The essential wit and wisdom of Charlie T. Munger*. Stripe Press.

NACE/ANSI SP502 (2010). *Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology*. NACE International.

SCH Geogas (2021). *Informe técnico: Inspección directa en 024-040 pozo 1*.

ServiEND (2021). *Informes Técnicos: OT-607/9-2/3-21, OT-7718-3007-21 y OT-7644-2848-21*.

Yacuzzi, E. (2007). *Un panorama de los modelos de decisión*. Universidad del CEMA.

Breve CV de los autores

Agustín Marcuzzi

Título y lugar de estudio: Ingeniero en Materiales, Instituto Sabato.

Trayectoria: Ingeniero en materiales con más de seis años de experiencia en el rubro Oil&Gas. Actualmente se desempeña como analista en el Departamento de Ingeniería e Integridad de Camuzzi.

Matías Pirotti

Título y lugar de estudio: Ingeniero Mecánico, Universidad de la Marina Mercante

Trayectoria: Con 8 años de exigencia como analista de Ingeniería e Integridad en Camuzzi, se desempeña desde abril 2023 como Jefe del Departamento de Ingeniería e Integridad.

Alejandro Lorenzo

Título y lugar de estudio: Ingeniero Mecánico de la Universidad de Buenos Aires con Postgrado de Metalurgia y Tecnología de Materiales de la Comisión Nacional de Energía Atómica, con trabajos de investigación en materiales en el Instituto de Tecnología Industrial (INTI), la Facultad de Ingeniería de la UBA y Comisión Nacional de Energía Atómica con publicaciones internacionales. (Año 1989 a 1993).

Trayectoria: Desde el año 1994 trabajo en Camuzzi Gas, la mayor Distribuidora de Gas Natural del país, que distribuye el gas natural en 363 localidades a lo largo de 7 provincias, desempeñándose actualmente como Gerente Técnico (desde el año 2007) y anteriormente, como Jefe Dpto. Integridad e Ingeniería.