

RESULTADOS OBTENIDOS CON NUEVAS TECNOLOGIAS EN LA APLICACION DE METODOLOGIAS DE EVALUACIÓN DIRECTA

Carlos J. Flores, Manuel Soares
Gas Natural Fenosa S.A.
Av. Gral. Paz y Av. De Los Constituyentes
CP1650
San Martín, Buenos Aires
carlosflores@gasnatural.com

Germán Rivas, Martín González
Gie S.A.
Galicia 52
CP7608
Mar del Plata, Buenos Aires
grivas@giempdp.com.ar

RESUMEN

Conocer más sobre los problemas permite la toma de mejores decisiones, de esta manera, cuando se utiliza DA¹ en un gasoducto, nuevas tecnologías permiten realizar un análisis más completo del fenómeno de la corrosión, y también de otras amenazas a la integridad de los ductos. Una de estas nuevas tecnologías, que se viene utilizando desde hace algunos años en cañerías, es Ondas Guiadas o LRGWUT². Una tecnología de ultrasonido de largo alcance desarrollada para detectar pérdidas de metal, con el objetivo de ensayar grandes volúmenes de material.

Uno de los principales problemas que enfrentan las compañías distribuidoras que poseen líneas de transmisión no aptas para el pasaje de herramientas ILI³ al aplicar DA, es la evaluación de integridad en sitios de difícil acceso como caños encamisados, cruces de ríos, o sitios que poseen el impedimento de realizar grandes excavaciones por pertenecer a zonas densamente pobladas. En esos lugares, LRGWUT puede ser un buen complemento de las técnicas convencionales.

Con el objetivo de realizar un análisis integral de la herramienta y verificar su aplicabilidad en líneas de transmisión no instrumentables, se recolectaron datos obtenidos aplicando la herramienta en evaluaciones directas realizadas por la distribuidora Gas Natural Fenosa, y se realizaron ensayos experimentales en una probeta construida para ello. En ella se mecanizaron defectos con distinta relación largo-ancho y profundidades variables, pudiéndose apreciar de cerca el fenómeno de atenuación y sensibilidad para la detección de defectos menores al 1% de área de sección transversal. Se realizó una comparativa entre las severidades obtenidas mediante el cálculo de presiones de falla y prioridades de seguimiento de los defectos mecanizados, obtenidas con la herramienta LRGWUT.

El análisis de los resultados de campo en conjunto con los experimentales, intentará servir como referencia del alcance y las limitaciones de la herramienta, al ser aplicada en líneas de transmisión no instrumentables.

Palabras clave: DA, ECDA⁴, Líneas de Transmisión, LRGWUT, Ondas Guiadas.

¹ Direct Assessment

² Large Range Guided Wave Ultrasonic Testing

³ In-Line Inspection

⁴ External Corrosion Direct Assessment

INTRODUCCION

La incorporación de la gestión de integridad en los códigos y estándares internacionales mandatorios exige a los operadores de las empresas que transportan hidrocarburos, dejar atrás una forma prescriptiva de realizar las tareas de mantenimiento, para pasar a otra, basada en las amenazas que impactan en el ducto y la realimentación de los resultados obtenidos al plan. Este nuevo paradigma se hizo extensivo a nuestros códigos en el año 2010 con la modificación de la normativa NAG 100⁵. La adenda denominada "Parte O", exige a las empresas transportistas y distribuidoras de gas de la República Argentina implementar un plan de gestión de integridad en las líneas que operan a una tensión circunferencial del 20% o más de su SMYS⁶.

En las empresas distribuidoras el alcance de esta modificación impacta sobre un subconjunto del total de las líneas. Estas poseen ciertas particularidades como ser: operan a bajas tensiones, la longitud axial de los defectos debe ser considerablemente mayor para producir una rotura, discurren por zonas densamente pobladas, no son aptas para el pasaje de herramientas ILI, no es asequible una prueba hidráulica debido a que las líneas no pueden dejar de operar, entre otras.

En consecuencia a estas dos últimas particularidades se opta por aplicar DA para llevar a cabo la evaluación de integridad, adquiriendo un rol preponderante la elección y el correcto uso de las herramientas de inspección indirecta, mencionadas en la práctica estándar SP0502⁷.

ECDA es uno de los enfoques DA sugerido por la industria en respuesta a las regulaciones. Fue diseñado para evaluar el estado de las cañerías y destinado específicamente a segmentos o líneas no instrumentables. Esta práctica recomendada, RP0502-2002, que hoy en día es un estándar adoptado por códigos internacionales mandatorios, proporciona los métodos y directrices para la realización de una evaluación de integridad en un gasoducto frente a la amenaza de corrosión externa. Su análogo para corrosión interna es la metodología ICDA⁸. Algunas de las herramientas y técnicas que subyacen en la metodología se han utilizado durante años por los operadores de gasoductos con el fin de monitorear e inferir en la integridad de sus sistemas. Con el advenimiento de este estándar, la aplicación a menudo inconsistente y la interpretación de estas técnicas, se convirtió en un proceso sistemático y auditable, que maximiza resultados.

En la primera etapa del proceso ECDA, el operador debe adoptar dos herramientas complementarias para la realización de la inspección indirecta en las regiones definidas. El problema se plantea en las regiones que poseen sitios de difícil acceso de inspección, como ser cruces encamisados y no encamisados de autopistas, cruces encamisados ferroviarios, cruces de ríos, cruces de acueductos, cruces de aliviadores pluviales o canales, en los que las herramientas de inspección indirecta convencionales poseen demasiadas limitaciones o son ineficaces. En estos sitios, y también en zonas de distribución cercanas a las grandes ciudades, donde la traza de los ductos atraviesa zonas densamente pobladas que impiden la realización de grandes aperturas de terreno; se hace necesaria la aplicación de nuevas tecnologías.

Los caños encamisados se convierten en sitios de difícil acceso de inspección cuando no se puede realizar una corrida de ILI en ellos. Las herramientas indirectas convencionales no poseen comunicación electrolítica con el caño conductor y por lo tanto, no pueden proveer información de su condición, solo es posible determinar si la misma está en contacto o no con la camisa, pero no se proporciona información con respecto a la integridad de la línea. Pueden producir datos relevantes para la evaluación de la condición del revestimiento y la eficacia de la protección catódica sólo bajo ciertas condiciones específicas que incluyen el aislamiento eléctrico entre la cañería y la camisa, un electrolito conductor en el espacio anular y una camisa sin revestimiento. Condiciones muy difíciles de encontrar en campo.

⁵ Normas Argentinas mínimas de seguridad para el Transporte y Distribución de Gas Natural y otros gases por cañerías

⁶ Specified Minimum Yield Strength

⁷ Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology

⁸ Internal Corrosion Direct Assessment

Una herramienta comenzada a utilizar en la industria del gas en este tipo de sitios, complementariamente, hace ya algunos años y que permite visualizar grandes volúmenes de material, es la herramienta LRGWUT, más conocida como Ondas Guiadas.

La herramienta fue comercialmente introducida en la industria del gas a principios del año 1998 para evaluar cañerías en servicio. Es una tecnología de ultrasonido de largo alcance desarrollada para detectar pérdidas de metal en cañerías. Tiene como objetivo principal ensayar grandes volúmenes de material desde un punto fijo, realizando un ensayo de largo alcance, rápido, identificando áreas de corrosión y erosión para futuras evaluaciones utilizando otras técnicas de ensayos no destructivos. Es principalmente una herramienta de visualización.

La principal ventaja de esta tecnología es que permite el examen de tramos largos de cañería, desde un solo punto, y realizando un ensayo que dura aproximadamente una hora. Por ejemplo, para cañerías enterradas, el alcance de la herramienta puede rondar los treinta metros en cada dirección, dependiendo de las condiciones de ensayo.

La evolución y mejoras significativas en la calidad de detección, la han convertido en un buen complemento para los casos en que se aplique DA en sitios de difícil acceso, o en evaluaciones directas donde se necesite maximizar la inspección frente a la amenaza de corrosión.

A diferencia del ultrasonido convencional, donde la inspección es localizada, en el sistema de ondas guiadas la inspección se realiza empleando un anillo de transductores piezoeléctricos para emitir ondas ultrasónicas de baja frecuencia que viajan hacia ambos lados del ducto, logrando la inspección de grandes distancias de cañería desde un punto de aplicación, **Figura 1**.

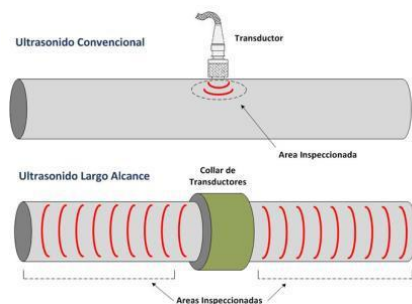


Figura 1. Izq: Ultrasonido convencional vs. Ondas Guiadas.

Al aplicar DA el operador se enfrenta con la constante toma de decisiones, ya que ninguna excavación es igual a otra. En algunas ocasiones el dilema “La cura es peor que la enfermedad” se hace presente al tener que tomar la decisión de retirar el revestimiento o no. Cuando uno encuentra revestimientos deteriorados con poca adherencia, la lógica indica que lo correcto sería retirar la longitud completa de excavación, evaluar, y revestir con algún revestimiento de igual o mejor calidad. Pero cuando existe revestimiento de buena calidad, buen estado de conservación y adherencia, valdría la pena analizar la situación un poco más en detalle. En los casos que se decida retirar solo anillos de revestimiento, LRGWUT también podría ser un buen complemento. Retirando solo unos metros de revestimiento se pueden visualizar longitudes que cubran la excavación in situ y cierta longitud de cañería enterrada, que depende del alcance obtenido en el ensayo.

En año 2010, el TG-410 de NACE⁹, desarrolló y revisó un proyecto de norma sobre la utilización de esta tecnología como una técnica de evaluación aceptada como lo son las pruebas hidráulicas, ILI, o Evaluación Directa. El proyecto que aún no ha sido aprobado y se basa en resultados de 60 excavaciones realizadas por el GTI¹⁰ y datos adicionales de diez operadoras que utilizaron la

⁹ Task Group 410 - National Association Corrosion Engineers

¹⁰ Gas Technology Institute

herramienta, demuestra que GWUT¹¹ encontró todos los defectos que fallarían en una prueba hidráulica.

PHMSA¹² en su Checklist publicado de 18 puntos¹³ para caños encamisados, acepta una sensibilidad con umbral mínimo de 5% de PST¹⁴, valor que deriva de los estudios arriba mencionados, y corresponde a un defecto que fallaría en una prueba hidrostática. Este proceso de 18 pasos, tiene el fin de ayudar a los inspectores en la evaluación y el correcto uso de la herramienta. Si se respetan estos puntos, PHMSA permite incluirla (previo aviso de 180 días) como parte del ítem "Otras Tecnologías" de evaluación de Integridad del Código Federal de los Estados Unidos. Evidentemente es una tecnología que ha demostrado ser eficaz hasta el momento y es tenida en cuenta por los códigos internacionales.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis integral de la herramienta y verificar su aplicabilidad en líneas de transmisión no instrumentables.

A continuación se describen los principales fundamentos de la técnica.

Fundamentos del Ultrasonido de Largo Alcance

Los ensayos de ultrasonido son utilizados como técnica de ensayo no destructivo para detectar defectos en una amplia variedad de estructuras y componentes, tanto en su etapa de fabricación como durante su servicio.

La tecnología de ultrasonido convencional emplea ondas de ultrasonido en el rango de los 2 a 10 MHz. Los pulsos viajan en un haz angosto y los ecos de los defectos localizados dentro de ese haz son detectados permitiendo caracterizar el defecto. El rango de inspección de este método es generalmente medido en milímetros o centímetros.

El ultrasonido de largo alcance se basa en la generación de ondas de placa u ondas de Lamb. Estas, con frecuencias en el rango de los 20 a 100 KHz., se propagan acorde a la interacción de las ondas de superficie generadas por las reflexiones (con cierto ángulo de incidencia particular) de un haz ultrasónico en las caras de una placa suficientemente fina.

Estas ondas se propagan varios metros a través del espesor del material pudiendo ser asimétricas (ondas de superficie en fase) o simétricas (ondas de superficie en contrafase).

Puede considerarse a las ondas guiadas de ultrasonido como un caso particular de las ondas de placa o Lamb viajando a través de una guía de ondas en lugar de una placa delgada, típicamente una cañería. De este modo, las ondas guiadas ultrasónicas que pueden generarse en una cañería se clasifican según su simetría respecto al eje de la misma en:

- Ondas Simétricas: Modo Longitudinal o Modo Torsional
- Ondas Asimétricas: Modo Flexural

¹¹ Guided Wave Ultrasonic Testing

¹² US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration

¹³ Guided Wave Check List 110107

¹⁴ Pérdida de Sección Transversal

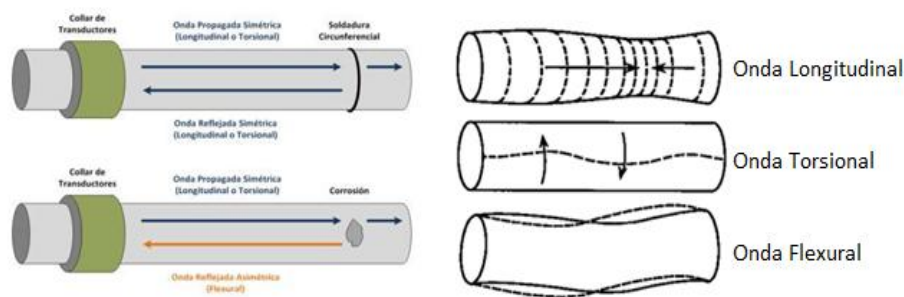


Figura 2. Izq: Características de las ondas simétricas propagadas (Longitudinales o Torsionales) o asimétricas reflejadas (Flexurales). Der: Modos de onda.

En la **Figura 2-D** puede observarse los modos de onda.

Principio de detección

Mediante la utilización de varios anillos de transductores piezoeléctricos es posible generar ondas guiadas simétricas (longitudinales o torsionales según el sentido en que se coloquen los transductores) que se propaguen en ambos sentidos de la cañería.

El mecanismo de detección de discontinuidades se basa en que la propagación de estas ondas se encuentra determinada por la frecuencia de la onda y el espesor de la cañería. En los puntos donde la onda enfrenta un cambio en el espesor del ducto, ya sea que este se incrementa o reduce, un porcentaje de la energía rebota y regresa a los transductores, **Figura 2-I**.

Por ejemplo en el caso específico de las soldaduras circunferenciales, el incremento del espesor es simétrico, por lo que la onda avanzará desde un reflector uniforme generando una onda reflejada también simétrica del mismo modo de onda que la incidente.

En el caso de un área corroída, la pérdida de espesor será localizada, produciendo una dispersión de la onda incidente y generando una conversión de modo de la onda reflejada, pasando esta a ser asimétrica (Flexural).

De esta forma, con anillos de transductores capaces de reconocer estas reflexiones asimétricas y utilizando modos y frecuencias de propagación poco dispersivos, es posible determinar a partir del tiempo en que se recibe la onda reflejada la ubicación de la discontinuidad sobre el ducto.

Por otra parte, tomando como referencia que las soldaduras circunferenciales de una cañería reflejan un 20% de la señal incidente, es posible estimar la pérdida o aumento del espesor en la sección transversal de las indicaciones detectadas.

En **Tabla 1** pueden apreciarse las características de reflexión de algunos elementos.

Tabla 1. Características reflexivas de algunos elementos¹⁵.

Característica	Visual	Amplitud	Forma	Frecuencia	Simetría	Fase	Orientación
Brida	Probablemente visible	Típicamente la más alta	Irregular	Inconsistente	Simétrica	N / A	Totalmente circunferencial
Soldadura	Puede ser visible	Media	Limpia, uniforme, eco simple	Consistente a través de todo el rango	Simétrica	Igual que todas las soldaduras	Totalmente circunferencial
Codo	Probablemente visible	Media	Primera: Limpia, uniforme. Segunda: Mayormente	Primera: Consistente. Segunda: Inconsistente	Primera: Simétrica. Segunda: No Simétrica	N / A	Primera: Totalmente circunferencial. Segunda: Dependiendo

¹⁵ ASTM E2775 – 11

			uniforme.				dirección del codo
Válvula / Drenaje	Probablemente visible	Media	Tamaño pequeño: Uniforme. Tamaño grande: Irregular	Tamaño pequeño: Consistente. Tamaño grande: Inconsistente	No simétrica	N / A	La parte superior o inferior de la cañería
Pieza T	Probablemente visible	Media	Irregular	Inconsistente	No simétrica	N / A	Parcialmente circunferencial
Reducción	Puede ser visible	Media	Irregular	Inconsistente	Simétrica	N / A	Totalmente circunferencial
Contacto corto	Probablemente visible	Baja	Limpia, uniforme, eco simple	Inconsistente	No simétrica	N / A	Inferior
Contacto largo	Probablemente visible	Baja	Irregular	Inconsistente	No simétrica	N / A	Inferior
Corto ménsulas de soporte	Probablemente visible	Media	Limpia, uniforme, eco simple	Inconsistente	Simétrica	N / A	Totalmente circunferencial
Soporte axial (soldado)	Probablemente visible	Media	Irregular	Inconsistente	No simétrica	N / A	Inferior
Montura	Probablemente visible	Media	Irregular	Inconsistente	No simétrica	N / A	Inferior

Algunas tecnologías como la que pondremos a prueba en este trabajo, adicionalmente permiten la realización de "focos" sobre las indicaciones detectadas posibilitando determinar la concentración y posición horaria de la pérdida de espesor.

Para la detección de reflexiones asimétricas el anillo de transductores se considera por mitades. La intensidad de señal de cada octante se rectifica.



Figura 3. Detección de asimetrías.

Para la detección de asimetrías con orientación vertical (línea azul de las gráficas) se compara:

$$B+A+H+G \text{ con } C+D+E+F$$

Para la detección de asimetrías con orientación horizontal (línea roja de las gráficas) se compara:

$$A+B+C+D \text{ con } H+G+F+E$$

Hardware y Software

El sistema utilizado en los ensayos de campo y experimentales fue el TeletestFocus+ del fabricante inglés Plan Integrity. Los mismos fueron asistidos por especialistas capacitados y nivelados en la utilización de esta tecnología y la correcta interpretación de resultados, bajo norma ISO 9712¹⁶.

¹⁶ Non-destructive testing / Qualification and certification of personnel

El sistema consta de tres componentes principales: un collar inflable con la cantidad requerida de módulos y transductores piezoeléctricos, la unidad central pulsora/receptora y un software de análisis.

En el interior de los collares se acoplan los módulos con los transductores piezoeléctricos que utilizan cinco transductores cada uno para generar simultáneamente ondas transversales y longitudinales. Al ser transductores de baja frecuencia, no requieren gel acoplante y la sola presión ejercida por el collar al inflarse es suficiente para la transmisión efectiva del ultrasonido al ducto.

El software permite controlar la unidad pulsora/receptora, el procesamiento de datos y la visualización y análisis de los mismos en un formato A-scan. Adicionalmente establece la curva DAC¹⁷ a partir de los picos de las indicaciones correspondientes a soldaduras. La función A-Map brinda una distribución circunferencial de las indicaciones sobre la cañería.

El ajuste de la curva DAC es un paso importante para establecer el alcance efectivo de la prueba y debe ser realizado en cada inspección. Las curvas proporcionan un medio para evaluar el cambio de área de la sección transversal, proveniente de reflexiones a varias distancias en el rango de prueba, mediante la evaluación de la relación señal-ruido. Es una línea de igual sensibilidad a lo largo de la traza que permite que la amplitud de las señales a diferentes distancias axiales del collar, puedan ser comparadas.

Interpretación de datos

En cada ensayo, las indicaciones identificadas en la pantalla tipo A (A-scan) del software no atribuibles a elementos característicos de la cañería como soldaduras, derivaciones, soportes, codos, etc., son evaluados a partir de la combinación de amplitud de la señal y direccionalidad del foco.

Se realiza la clasificación con respecto a la amplitud, dando como respuesta una categoría de amplitud 1, 2 ó 3 siendo la categoría 3 la más severa, **Figura 4**.

La clasificación de una indicación como 3 demuestra que la amplitud de la respuesta fue la presencia de una reflexión mayor al 14% de pérdida de metal en la totalidad del área de su sección transversal (CSA¹⁸).

La categoría 2 muestra que la señal fue observada sobre una cañería con pérdida de metal en su sección entre el 9 y 14%.

Una clasificación de categoría 1 muestra que la señal fue observada sobre una cañería con pérdida de metal en su sección menor al 9 %.

¹⁷ Distance Amplitud Correction Curve

¹⁸ Cross Sectional Area

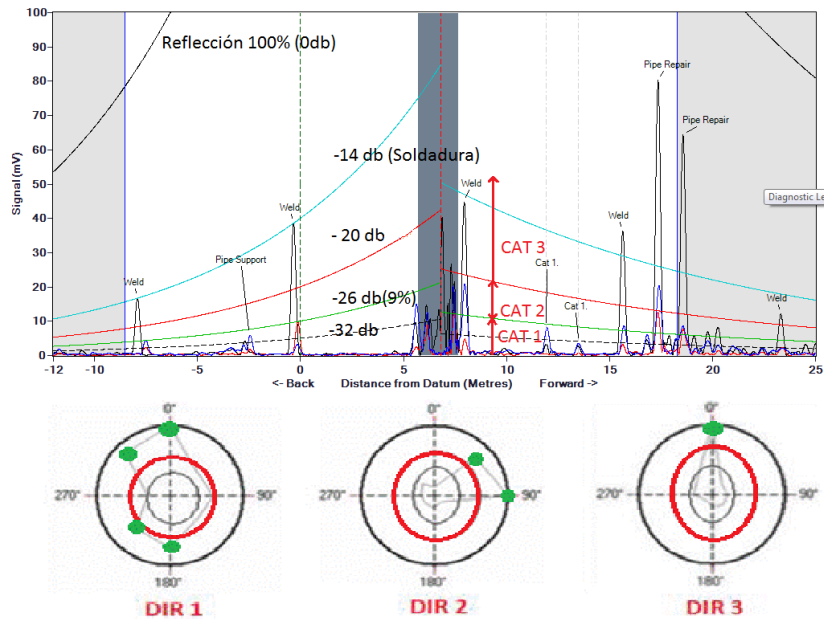


Figura 4. Arriba: Curvas DAC y señales reflejadas. Abajo: Focalización de los defectos.

En las gráficas de reflexión cada color representa un tipo de onda y los colores son, Negro: reflexiones simétricas (Longitudinal o Torsional dependiendo de con cual se esté ensayando), Azul y Rojo: reflexiones asimétricas (Flexurales) con orientación vertical y horizontal respectivamente.

Con el fin de proporcionar un medio de identificación de los defectos que podrían ser potencialmente significativos en términos de la integridad de la cañería, también es necesario ensayar cómo se localiza la respuesta en términos de la ubicación circunferencial de la cañería. Esto puede obtenerse a partir de los ensayos de Foco sobre las indicaciones y su respectiva representación en un gráfico polar, **Figura 4**.

El resultado del ensayo del foco sobre cada defecto, es analizado en términos de direccionalidad de la respuesta. Esto es clasificado en términos de direccionalidad 1, 2, ó 3 siendo 3 el caso del más localizado.

La clasificación de una indicación como direccionalidad 3 indica que el defecto es altamente localizado sobre la parte de la circunferencia indicada, o que es probable que sea profunda para una determinada amplitud de la respuesta.

En la **Figura 4-Abajo** puede observarse la intensidad de la reflexión del foco en cada octante. Cuanto más "afuera" esta el punto, más intensa es la reflexión respecto del resto de los octantes y la distribución de los puntos determina la siguiente categorización:

DIR 3: Un solo punto está fuera del círculo rojo. La reflexión es más intensa en ese octante, el defecto está más concentrado en esa posición horaria.

DIR 2: Dos puntos están fuera del círculo rojo. El defecto es menos concentrado.

DIR 1: Más de dos puntos están fuera del círculo rojo.

Si bien la técnica recomienda la inspección directa de todas las indicaciones detectadas, también ofrece una tabla para priorizar las inspecciones, **Figura 5**. La combinación de la categoría y direccionalidad de una indicación permite asignarle una prioridad de seguimiento para inspección. Luego, se recomiendan inspecciones cuantitativas para la evaluación de las indicaciones.

		Amplitud de la Señal			
		Cat 1	Cat 2	Cat 3	
Dirección del Foco	Dir 1	1	2	3	Alta
	Dir 2	2	4	6	Media
	Dir 3	3	6	9	Baja

Figura 5. Tabla de priorización de las indicaciones.

Para caños encamisados, PHMSA establece un rango mínimo del 5 % de CSA. Es decir, solo se examinan directamente las indicaciones que superan ese umbral mínimo.

Atenuación

La atenuación es la pérdida de señal medida que se propaga a lo largo de una estructura. Esta puede ser causada por una combinación de factores tales como: la disipación, la conversión de modo, la dispersión debido a la rugosidad superficial, la absorción en otros medios, etc. La tasa de atenuación de la señal es el factor que determina el rango de prueba máxima para cualquier configuración. Se especifica como señal perdida por distancia recorrida y se expresa como dB/m.

Las ondas guiadas son atenuadas por absorción y dispersión, pero también son atenuadas por "fugas" de energía sonora a través de las superficies internas y externas de la cañería.

Los recubrimientos tienen un gran efecto en la atenuación de la señal. Su espesor y condiciones, son factores principales que afectan el porcentaje de atenuación y debido a su variabilidad, hacen que sea difícil predecir la distancia eficaz de inspección. Algunos tipos de revestimiento, como es el caso de los bituminosos, pueden reducir considerablemente la distancia de inspección.

Rango y sensibilidad

Se establece el rango de inspección y la sensibilidad con la relación señal ruido SNR¹⁹. Cualquier señal que tenga una amplitud de aproximadamente el doble del nivel de ruido se puede interpretar en forma fiable. Cuanto mayor sea la relación SNR, más fácil será identificar e interpretar las señales en pequeños cambios en el CSA. La SNR depende de diversas variables, tales como, la rugosidad superficial, el revestimiento, estado del revestimiento, instalaciones asociadas, compactación del terreno, etc. Cada uno de estos elementos afecta a la propagación de las ondas sonoras e influye en el alcance de la prueba.

La sensibilidad se define como la capacidad de identificar un reflejo en un cambio de la sección transversal especificada. La SNR determina la detectabilidad a una cierta distancia y por lo tanto establece el rango. La sensibilidad mínima lograda debe ser capaz de identificar los defectos más pequeños y es objeto de estudio en el presente trabajo.

Selección de modos y frecuencias

A diferencia del ultrasonido convencional donde se utilizan pulsos angostos de alta frecuencia, en esta técnica se utilizan ondas de menor frecuencia y pulsos anchos.

En la **Figura 6** se muestran las señales de excitación enviadas a los dos anillos para un ensayo Torsional en 37 KHz.

¹⁹ Signal to Noise Ratio

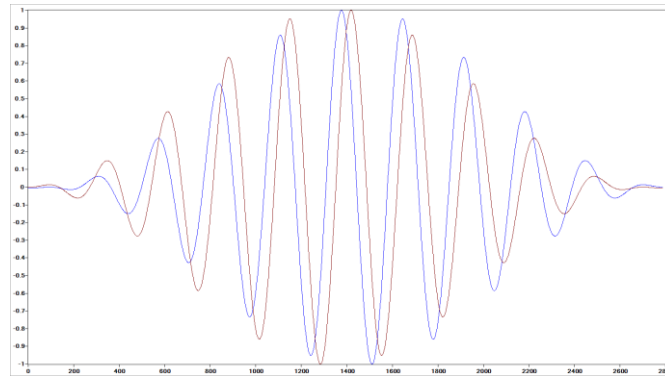


Figura 6. Señal de excitación – Torsional 2 Anillos 37 KHz.

Al no utilizar pulsos angostos, estos se ven afectados por la dispersión. Cada componente de frecuencia del pulso viaja con distinta velocidad de fase, haciendo que este se “ensanche” a medida que viaja por la cañería inutilizándolo para la detección de anomalías.

En la **Figura 7** se muestran las gráficas de dispersión (Velocidad de Fase vs. Frecuencia), para una cañería de 12” y 7.14 mm de espesor de pared.

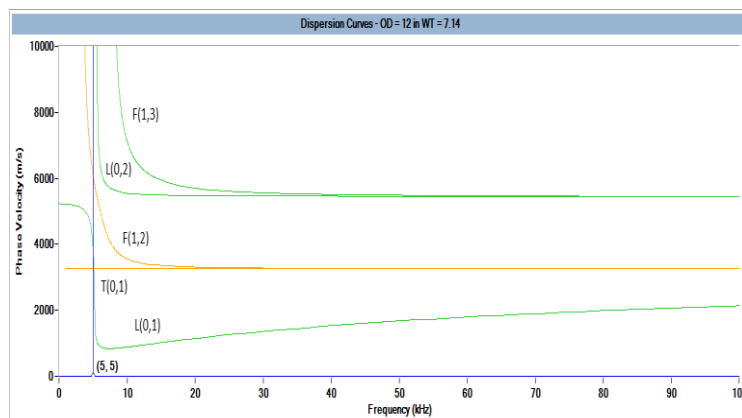


Figura 7. Gráficas de dispersión para un diámetro y espesor de 12” pulgadas.

El primer modo longitudinal L(0,1) es fuertemente dispersivo en todo el espectro, por lo que no puede utilizarse para la inspección con ondas guiadas. El modo L(0,2) y su correspondiente modo flexural F(1,3) devuelto por reflectores no simétricos, dejan de ser dispersivos a partir de cierto valor de frecuencia.

En el caso del modo torsional, el primer modo T(0,1) no es dispersivo pero si su correspondiente modo flexural F(1,2) por debajo de cierto valor de frecuencia.

Así, el límite inferior del rango de frecuencias que puede utilizarse manteniéndose no dispersivo varía de acuerdo al diámetro de la cañería. A menor diámetro, mayor es la frecuencia más baja que puede utilizarse.

La inspección debe realizarse con un único modo de propagación presente en la cañería, por lo que el rango superior de frecuencias utilizables está limitado por la aparición de modos de propagación superiores no deseados como T(0,2) y L(0,3) por ejemplo. A mayor espesor, menor es la frecuencia más alta que puede utilizarse.

Por otra parte, el acoplamiento de los transductores a la cañería no es el mismo para todas las frecuencias. En la **Figura 8** se muestra el caso de ondas torsionales donde el máximo de potencia transferida se ubica en dos frecuencias y se muestran también las frecuencias donde la potencia cae 3 dB. Se observa en la **Figura 9** que para el modo longitudinal la potencia máxima se da en un único punto.

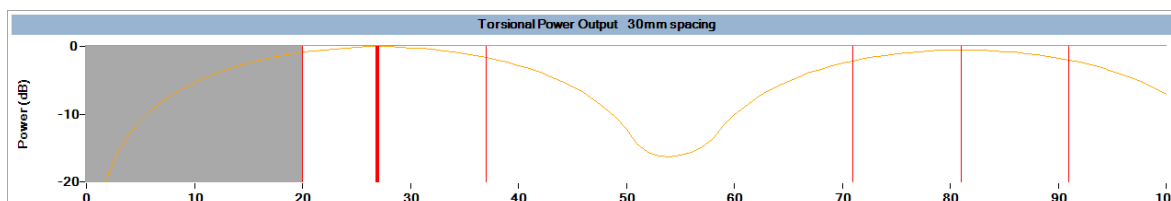


Figura 8. Potencia transferida a la cañería para modo torsional con 2 anillos separados 30mm.

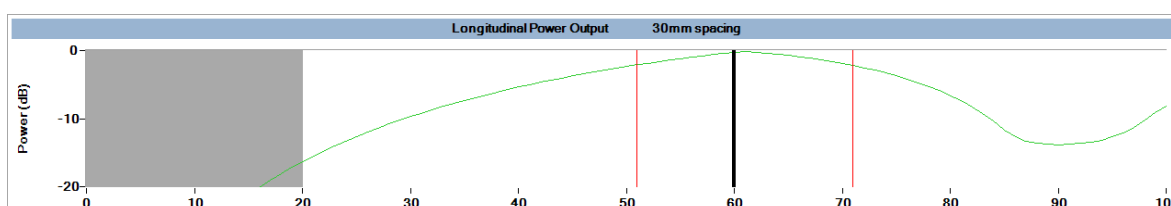


Figura 9. Potencia transferida a la cañería para modo longitudinal con 3 anillos separados 30mm.

De este modo, la selección de frecuencias de ensayo se realiza según los siguientes criterios:

- Transmitir un único modo de propagación T(0,1) ó L(0,2) evitando la aparición de modos superiores.
- Evitar la zona del espectro de frecuencias donde los modos simétricos torsional o longitudinal y el asimétrico flexural, son dispersivos.
- Maximizar la transferencia de potencia ultrasónica a la cañería.

Luego, el software selecciona las frecuencias de ensayo según los criterios mencionados. Para los ensayos realizados en este trabajo, las frecuencias utilizadas son:

Modo Torsional:

- 20 KHz. (Límite inferior ultrasonido)
- 27 KHz. (Máxima potencia transferida – Primer lóbulo de potencia)
- 37 KHz. (Corte 3dB Superior – Primer lóbulo de potencia)
- 71 KHz. (Corte 3dB Inferior – Segundo lóbulo de potencia)
- 81 KHz. (Máxima potencia transferida – Segundo lóbulo de potencia)
- 91 KHz. (Corte 3dB Superior – Segundo lóbulo de potencia)

Modo Longitudinal:

- 51 KHz (Corte 3dB Inferior)
- 60 KHz (Máxima potencia transferida)
- 71 KHz (Corte 3dB Superior)

Luego, se analizan las frecuencias en la que se obtiene mejor respuesta de acuerdo a las características de la cañería ensayada.

ENSAYOS EN LINEAS DE TRANSMISIÓN

Desde la implementación del Plan Base en líneas de transmisión del año 2010, la Distribuidora GNF²⁰ ha realizado varias evaluaciones directas en las que incluyó, como complemento, la herramienta LRGWUT en DA. La finalidad de esta decisión fue proveer una herramienta que pueda evaluar la integridad en lugares de difícil acceso, y en otros, maximizar el alcance de inspección (metros lineales inspeccionados) frente al fenómeno de la corrosión, o evitar retirar grandes cantidades de revestimiento en buen estado.

Para evaluar la amenaza de corrosión interna GNF utilizó la metodología DA denominada ICDA. El proceso de Evaluación Directa de Corrosión Interna denominado, requiere la recolección y análisis de datos actuales e históricos, para poder establecer si hubo o existe presencia de agua, determinando los lugares de la línea que tienen más probabilidades de acumularla, y prevé una evaluación de esos sitios. Al evaluar la existencia de esta amenaza a la integridad en cañerías no instrumentables, los métodos de relevamiento por grilla ultrasónica convencional suelen ser poco eficientes, cuando se trata de muestras grandes, y su eficacia, depende de la densidad de puntos relevados. Por ello, se optó también por complementar las intervenciones ICDA con GWUT, para poder visualizar si existiera, algún foco de corrosión interna.

La técnica GWUT no puede determinar si la pérdida de metal es interna o externa. Las ondas torsionales o longitudinales se reflejan en cambios de espesor o faltantes de sección transversal, sin discriminar si son externos o internos. Si se detectara una indicación con la herramienta y no es posible visualizarla exteriormente, se deberán realizar ensayos no destructivos para poder encontrarla y cuantificarla.

Si bien las excavaciones analizadas en este trabajo fueron llevadas a cabo evaluando el fenómeno de corrosión externa, al aplicar la herramienta GWUT en ellas, se estuvo evaluando la amenaza de corrosión interna.

Las indicaciones encontradas durante los ensayos fueron todas externas, no pudiendo encontrar evidencia de corrosión interna, ni pudiendo corroborar en campo, la capacidad de la herramienta para detectar este tipo de indicaciones.

Una de las peores condiciones de atenuación para la herramienta se manifiesta en inspecciones con recubrimientos bituminosos. Las operadoras de gas de la Argentina poseen grandes extensiones de gasoductos revestidos con este material.

A continuación en **Tabla 2**, puede observarse que los revestimientos bituminosos llegan a atenuar hasta -16 dB/m, y llegan a reducir el rango de inspección a 2 metros.

Tabla 2. Atenuación típica y rango de medición bajo distintas condiciones de ensayo²¹.

Condición de Prueba	Atenuación Típica	Rango Típico de Prueba
Limpio, cañería sin codos	-0.15 a -0.5dB/m	50–200 m
Insignificante/Menor Corrosión	-0.5 a -1.5 dB/m	20–50 m
Corrosión significativa	-1 a -2 dB/m	15–30 m
Envuelto en Kevlar	-0.15 a -1 dB/m	30–200 m
Revestimiento Epoxi	-0.75 a -1 dB/m	30–50 m
Tierra compactada	-1 a -2 dB/m	15–30 m
Fina (<2,5 mm), bituminoso	-1.25 a -6 dB/m	5–25 m
Grueso (> 2,5 mm), bituminoso	-4 a -16 dB/m	2–8 m
Bien adheridas muro de hormigón	-16 a -32 dB/m	1–2 m
Mal adheridas muro de hormigón	-4 a -16 dB/m	2–8 m

En **Tabla 3** se describen los parámetros más importantes de algunas actuaciones con la

²⁰ Gas Natural Fenosa

²¹ ASTM E2775 – 11

herramienta GWUT en el ámbito de concesión de GNF, para poder observar el alcance obtenido con la misma.

Tabla 3. Resultados de los ensayos realizados en líneas de transmisión de la distribuidora Gas Natural Fenosa.

ID	Línea	Inst.	MOP	Diám.	Long. Excav.	Long. GWUT	Long. Insp.	Fallas GWUT	Cat.	Direcc.	Prioridad Seg.	PF ²² / MAOP	Sold. Fabric.	Revest.
1	25.03	Línea	22	24	14,7	26	40,7	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
2	25.03	Línea	22	24	16,3	24,9	41,2	1	2	1	Media (2)	3.1	Helic.	Bitumen
3	25.03	Línea	22	24	15,2	23,8	39	2	1-2	1-2	Baja (1) – Alta (4)	3.09-3.11	Helic.	Bitumen
4	25.03	Línea	22	24	13,1	35,8	48,9	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
5	25.03	Línea	22	24	10,8	25,4	36,2	2	1-1	1-1	Baja (1) – Baja (1)	3.02-3.10	Helic.	Bitumen
6	25.02	CC - Cruce Colect.	22	30	4,25	24,1	28,35	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
7	25.04	Línea	22	24	15	24,8	39,8	-	-	-	-	-	Helic.	Pintura
8	25.04	Línea	22	24	14	34,66	48,66	-	-	-	-	-	Long.	PE Tricapa
9	25.04	Línea	22	24	17	34,5	51,5	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
10	25.04	Línea	22	24	17	32,5	49,5	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
11	25.04	Línea	22	24	13	30,5	43,5	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
12	25.04	Línea	22	24	13	35,3	48,3	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
13	25.04	Línea	22	24	15	27,8	42,8	-	-	-	-	-	Helic.	Bitumen
14	25.14	CC - Cruce Ferroc.	22	24	4,19	21,8	25,99	-	-	-	-	-	Long.	Bitumen
	Total	-	-	-	182,5	401,86	584,4	5	-	-	-	-	-	-

Como puede observarse, la cantidad lineal de gasoducto evaluado por DA suma 182.5 metros, que sumados a los 401.86 metros inspeccionados con la herramienta, da como resultado un total de 584.4 metros totales inspeccionados. Se obtuvo un incremento de más del 200%.

Es evidente que utilizando esta tecnología, la cantidad de metros inspeccionados aumenta considerablemente. Por ello, en lo que resta de este trabajo, trataremos de indagar sobre la eficacia de la herramienta para la detección de defectos.

Los relevamientos indirectos realizados en los sitios donde se llevaron a cabo las excavaciones 2,3 y 5, particularmente denotaron zonas continuas acotadas con bajos potenciales y una alta densidad de indicaciones con caída IR<30% y Cat/Cat, mayoritariamente.

Se encontró revestimiento deteriorado con poca adherencia en los tres sitios. Las fallas de revestimiento en excavaciones 2 y 5 no poseían pérdida de material, y en excavación 3, se encontró dos defectos con d/t<10% no reparables. Las fallas de corrosión encontradas con la herramienta GWUT fueron ubicadas fuera de los límites de las excavaciones, muy cercanas a los extremos y fueron evaluadas directamente. Como se puede observar en **Tabla 3**, fueron categorizadas, focalizadas y priorizadas.

²² Calculada con ecuación NG-18.

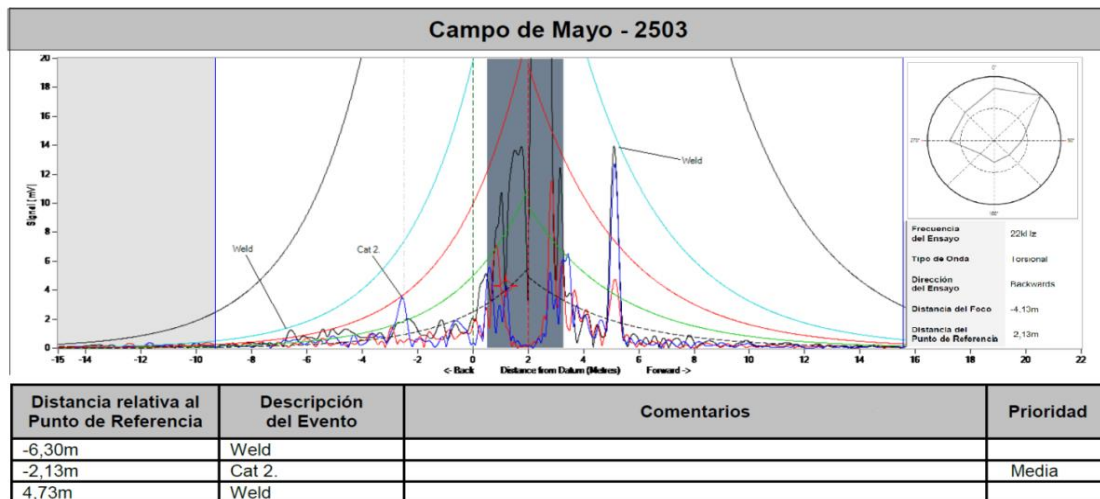


Figura 10. Pozo Id 2 – Campo de Mayo.

Los defectos encontrados con la herramienta, se cuantificaron verificando en todos un factor de seguridad superior a 3, **Tabla 3**. La SMYS utilizada para el cálculo de las presiones de falla, fue obtenida en campo por un ensayo de indentación. Se obtuvieron valores de tensión de fluencia y rotura que cumplen los requerimientos de un material X42. La tensión circunferencial resultante fue 35% de la SMYS. Dado que los valores de Pf^{23} exceden la SMYS, se decidió no reparar los defectos.

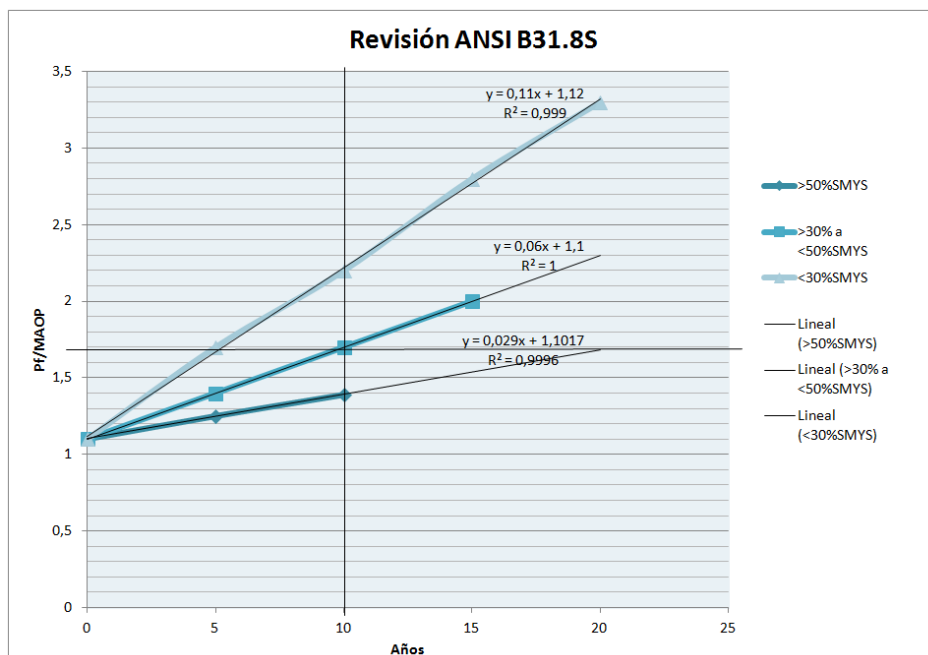


Figura 11. Tiempos de respuesta programado B31.8S

Los defectos fueron encontrados en cañerías con soldaduras de fabricación helicoidal, estas soldaduras aumentan el nivel de ruido, producen más atenuación y reducen el SNR²⁴, pero quedó demostrado que la detección fue eficaz.

Se realizaron algunas aperturas de terreno extra en lugares sin indicación GWUT, para comprobar la inexistencia de los mismos con resultados satisfactorios.

²³ Presión de Falla

²⁴ Signal-To-Noise Ratio

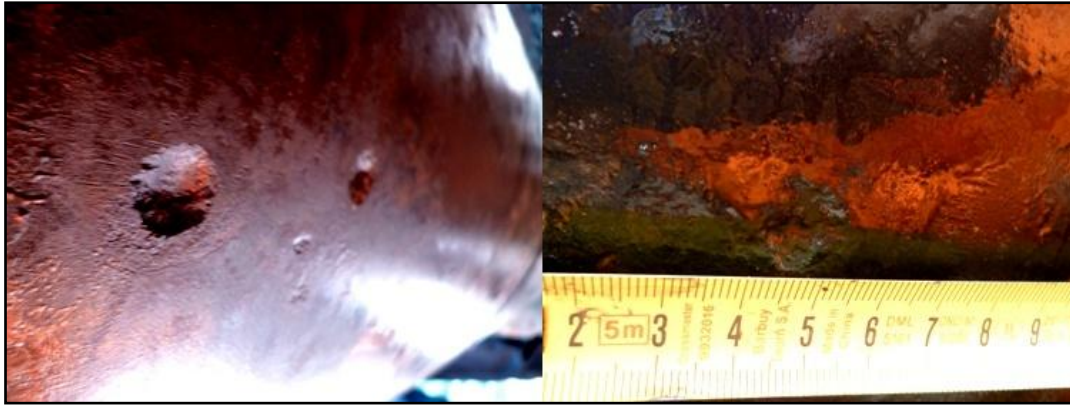


Figura 12. Defectos volumétricos encontrados en línea de transmisión 25.03-GNF.

El rango teórico para este tipo de revestimientos en el mejor de los casos es de 8 metros, **Tabla 2**. En los ensayos realizados, el rango promedio alcanzado sobre las cañerías con revestimiento bituminoso fue de 11 metros aproximadamente.

Cuando se ensaya un caño revestido que transporta gas, algo de energía de la onda guiada propagada por la pared del caño puede filtrarse en el revestimiento y la señal se atenúa a medida que avanza a lo largo de ésta, reduciendo de este modo la distancia de propagación de la onda. La cantidad de energía fugada depende del modo de onda, de la impedancia acústica y de las propiedades de atenuación del revestimiento. Un revestimiento que tiene una impedancia acústica baja y no está fuertemente adherido a la cañería, no tiene prácticamente ningún efecto sobre las ondas. Sin embargo, si la cañería está recubierta por sustancia bituminosa, ambos modos (torsional y longitudinal), pueden fugar desde la cañería. La tasa de fuga entonces es controlada por la fuerza de adhesión sobre el caño y la frecuencia de modo de propagación.

En los caños ensayados con revestimiento bituminoso, la adherencia encontrada fue pobre. Se considera que esta condición influyó para lograr un mayor alcance de lo esperado.

A continuación se detallan dos inspecciones, una realizada en terreno muy agresivo con napa alta, en donde fue muy difícil excavar, y otra en una zona de difícil acceso, densamente poblada.

DA – Campo de Mayo – Partido de San Miguel – Buenos Aires

Diámetro de la Línea: 24”

Denominación: 25.04 – Campo de Mayo - Puente Matanza

PK Intervención: 0+142

Georreferencia: -34.563633288 -58.645097689

El gasoducto donde se llevó a cabo la intervención fue construido en 1962 por la empresa estatal Gas del Estado y en su parte troncal posee una extensión de 26.4 Km. Se inicia en Campo de Mayo y finaliza en el Partido de La Matanza. Con motivo de verificar la integridad del ducto se inspeccionó aplicando DA.

Se verificó la integridad del gasoducto mediante la herramienta GWUT, posicionando el anillo en 2 ubicaciones cercanas a las interfaces aire-tierra aguas arriba y aguas abajo, con el objeto de determinar el estado de la máxima longitud posible, de cañería enterrada.

La profundidad de tapada de la cañería fue 4.5 metros en esa progresiva, el terreno muy agresivo, de muy baja resistividad, y dada la altura de las napas, se tuvo que trabajar con bombas sumergibles en constante operación. El lugar de excavación estaba situado muy cercano a un afluente del río Reconquista.

La longitud de la inspección visual fue de 14 metros, con la herramienta se inspeccionó un total de 34.66 metros sumando un total de 48.66 metros totales inspeccionados. No se detectaron indicaciones.



Figura 13. Izq: Excavación en línea 25.04. Der: Ondas Guiadas en ducto 25.04.

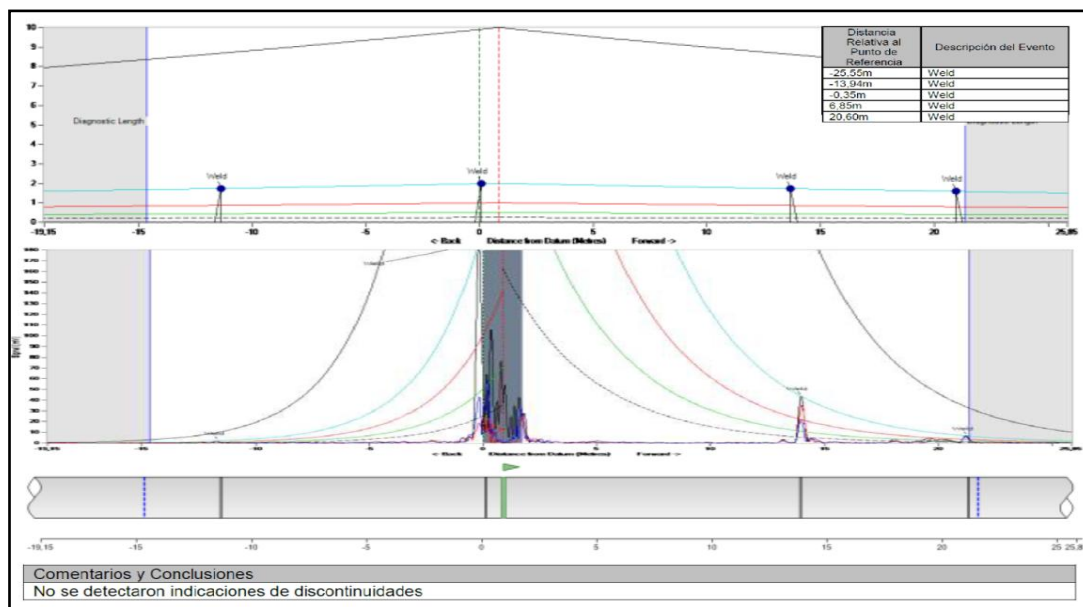


Figura 14. Ensayo aguas arriba de Ondas Guiadas en Campo de Mayo LT 25.04.

DA – Ugarte y Panamericana – Partido Vicente López – Buenos Aires

Diámetro: 30"

Denominación: Gasoducto 25.02 – Cruce Encamisado Ugarte y Panamericana -

Georreferencia: -34.523927-58.511363

PK: 16+569

El gasoducto donde se llevó a cabo la intervención posee 23 años de antigüedad y discurre por colectora de autopista Panamericana desde el Partido de Tigre hasta Vicente López. Con motivo de verificar la integridad del ducto se inspeccionó aplicando la metodología DA.

Con el objeto de determinar el estado de conservación de un tramo de cañería encamisada, se inspeccionó mediante GWUT, desde un solo extremo, **Figura 15**. Si bien no es lo recomendable, se optó por inspeccionar de esta manera, debido a que las condiciones de seguridad no estaban dadas para realizar la excavación del otro extremo del encamisado. La tapada era de más de 4.4 metros y el entorno no permitía la realización de una excavación segura.

El sello inspeccionado del caño camisa se encontró en buenas condiciones. Se lo retiró para poder realizar una inspección visual del interior del encamisado. No se encontró evidencia de corrosión externa, ni de sustancias ocupando el espacio anular, **Figura 15**.

La longitud del CC²⁵ era de 10 metros, por lo que a pesar de no cumplir uno de los 18 puntos²⁶ que recomienda la PHMSA, la inspección se consideró exitosa.

Se inspeccionó visualmente en la excavación una longitud de 4.25 metros, con la herramienta se inspeccionó 12.00 metros de la parte enterrada y 12.10 metros dentro del caño camisa. El total inspeccionado fue de 28.35 metros lineales. No se detectaron indicaciones.

Específicamente en caños encamisados, para obtener buenos resultados de ensayo, es conveniente que los operadores tengan cierta información del encamisado, previo al ensayo. Por ejemplo existe alguna sustancia ocupando el espacio anular, como cera, agua, barro, o si posee sellos hechos de tapones de breña, etc. Todo esto, además del recubrimiento, puede llegar a interferir en la eficiencia de la prueba.

Para asegurarse de que todo el segmento encamisado se evaluó correctamente, la SNR debe ser al menos de 2 a 1 en todo el segmento encamisado. Esto puede requerir varios disparos con la herramienta.



Figura 15. Izq: Inspección GWUT en Casing 30" en Ugarte y Panamericana-VL. Der: Inspección visual interna del encamisado.

En la **Figura 16** puede observarse la gráfica resultante perteneciente al ensayo realizado en caño encamisado.

²⁵ Caño Camisa

²⁶ Referencias - Guided Wave Check List 110107

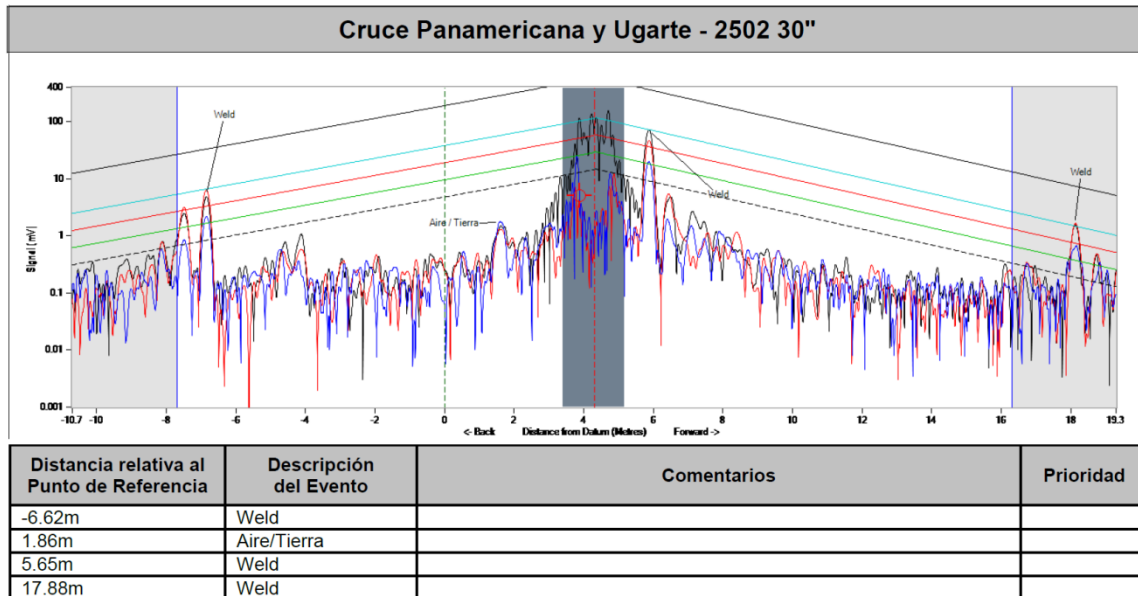


Figura 16. Gráficas de señal obtenida en ensayo Panamericana y Ugarte.

ENSAYOS EXPERIMENTALES

Con el fin de realizar ensayos experimentales y poner a prueba la capacidad de detección de la herramienta, se construyó en el predio denominado “Almacén Crovara”, propiedad de la distribuidora Gas Natural Fenosa, una probeta de 38 metros de longitud, constituida por 3 cañerías de 12 pulgadas de diámetro, **Figura 17.**



Figura 17. Izq: Centro Crovara. Der: Probeta construida para la realización de los ensayos.

Las características de fabricación de los caños utilizados para la construcción de la probeta se resumen en **Tabla 4.**

Tabla 4. Características de los caños utilizados en la construcción de la probeta.

ID Cañería	Longitud [m]	Espesor [mm]	Material	Soldadura Fabricación	Revestimiento	Espesor revestimiento [mm]
1	13.08	6.70	Sin datos	ERW	PE – Bicapa	2
2	12.06	6.50	API 5L X56	ERW	PE – Bicapa	2
3	12.68	6.50	API 5L X56	ERW	PE – Tricapa	4

Para la construcción de la probeta se utilizó el proceso de soldadura SMAW, utilizando electrodos celulósicos E6010 y E7010, tratando de realizar una soldadura de la mejor calidad posible, que

genere la mínima atenuación y una reflexión simétrica. En la **Figura 17-D** se observa el resultado final de esta etapa.

Prueba de Material

Se desconocía el material del caño 1, así que para poder realizar los cálculos de presión de falla en los defectos, se decidió realizar un ensayo denominado indentación instrumentada. Para ello se utilizó un equipo portátil, **Figura 18**, y se determinaron las propiedades mecánicas del material mediante realización de una indentación en varios ciclos, y el registro simultáneo de carga y desplazamiento. En la **Tabla 5** se detallan los resultados obtenidos de tensión de fluencia, tensión de rotura.

Tabla 5. Resultados obtenidos en el ensayo

ID Cañería	Fluencia σ_{YS} [MPa]	Rotura σ_{UTS} [MPa]
1	416.26	648.84
2	398.01	579.09
3	411.89	626.37

Pudo observarse en los resultados obtenidos, que los caños analizados cumplen con los requerimientos mínimos y máximos de un acero API 5L X56, **Tabla 6**.

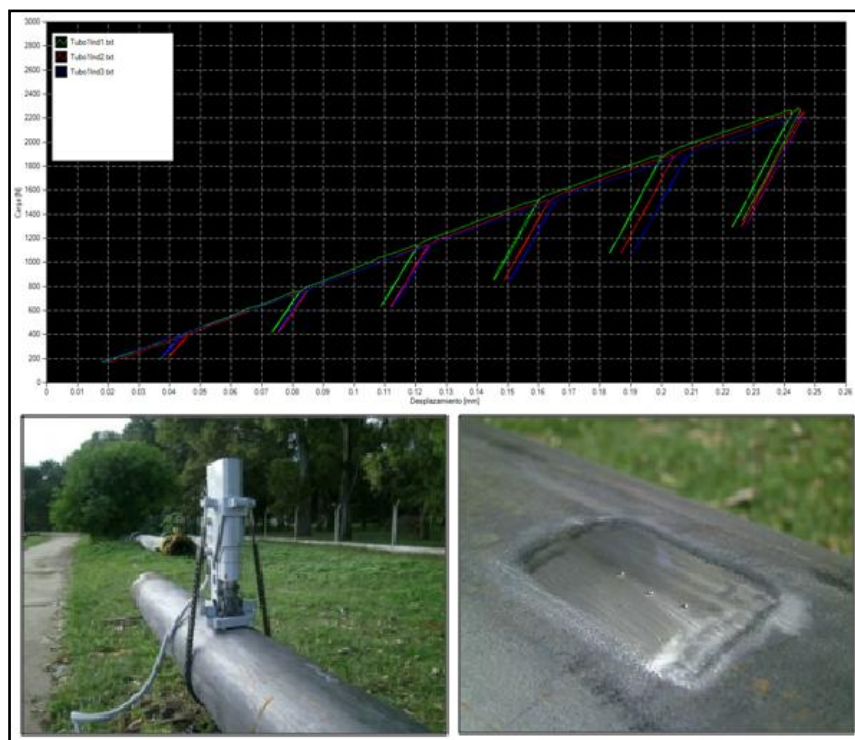


Figura 18. Arriba: Gráfico carga-desplazamiento en material cañería 1. Abajo Izq: Indentador montado sobre la probeta. Abajo Der: Marcas de indentación realizada en cañería 1.

Tabla 6. Requerimientos de API 5L PSL2 para aceros.

Grado acero	Fluencia		Rotura	
	Mín σ_{YS} [MPa]	Máx σ_{YS} [MPa]	Mín σ_{YS} [MPa]	Máx σ_{YS} [MPa]
X52	359	758	455	758
X56	386	758	490	758
X60	414	758	517	758

Cuando se aplica DA, este tipo de ensayos no destructivos puede ser de mucha utilidad si se desea corroborar el tipo de material de la cañería, o en lugares donde se tienen adoptadas suposiciones muy conservativas por no poseer el dato.

Atenuación

El revestimiento de la cañería identificada como 3, poseía una mejor adherencia, mejor calidad y mayor espesor, en comparación con los revestimientos de los caños 1 y 2. La elección de este caño con estas características se realizó tratando de evidenciar el fenómeno de atenuación. Se suponía obtener a priori, una apreciable atenuación en dicho tramo.

Presión de falla de los defectos (Pf)

Se realiza el cálculo de las presiones de falla en los defectos para poder realizar una comparativa con las priorizaciones obtenidas con la herramienta.

La fórmula utilizada para el cálculo de la presión de falla, tiene como base la propuesta por el Instituto Batelle, en base a estudios de Kiefner, Maxey, Duffy y otros, alrededor del año 70. Es denominada ecuación NG-18 y se describe de la siguiente manera:

$$\sigma_f = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0} M^{-1}} \right] \quad \text{Ecuación 1. NG-18}$$

Dónde:

σ_f = Tensión de Falla Predecida

$\bar{\sigma}$ = Tensión de Flujo, f{SMYS}

A = Área Efectiva de Pérdida de Metal

A_0 = Área Original, {L x t}

M = Factor de Folias, f{L, D, t}

L= Longitud Efectiva

M = Factor de Folias

$$M = \sqrt{1 + 0,62756 * \frac{L^2}{D * t} - 0,003375 * \left(\frac{L^2}{D * t} \right)^2}$$

Para:

$$\frac{L^2}{D * t} > 50$$

$$M = 0,032 \left(\frac{L^2}{D * t} \right) + 3,3$$

El valor alternativo de M es porque para valores muy largos de L (Defecto F), el término negativo comienza a prevalecer invalidando la expresión. Esto se salva extrapolando con una recta como se ve en la siguiente ilustración:

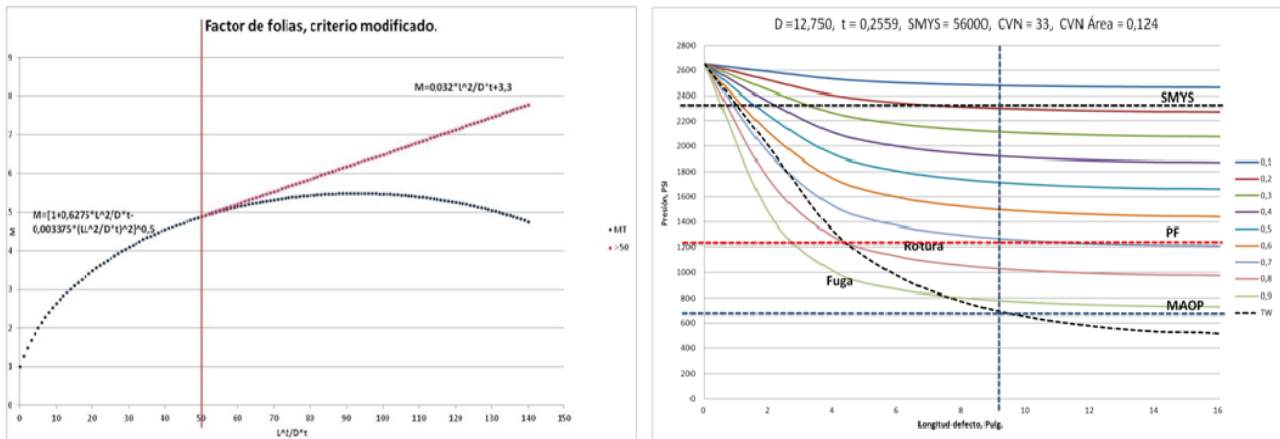


Figura 19. Izq: Modificación NG-18 para fallas largas. Der: Curvas de presión de falla para distintos d/t y caño 12" (probeta).

Para cálculos rápidos y la construcción de tablas y gráficos es apropiada una aproximación geométrica en la cual A es $0.85 \cdot d \cdot L$ y A/A_0 es $0.85 \cdot d/t$. Con el cambio se pueden analizar fallas más largas que con la representación parabólica.

Se recuerda que para valores de d/t mayores o iguales a 0.8, los defectos deben ser removidos o reparados, para prevenir una fuga. En ningún ensayo experimental se igualó o superó un d/t de 0.8.

Para los cálculos de las Pf en los ensayos experimentales se presupone una presión operativa de 45 Kg/cm^2 . El cálculo del porcentaje de SMYS al que trabaja se calcula aplicando la siguiente expresión.

$$P = \frac{2St}{D}$$

Ecuación 2. Fórmula de Barlow

Dónde:

P = Presión

S = Tensión Admisible

t = Espesor

D = Diámetro Externo

Como puede observarse en la gráfica de la **Figura 19** el caño operaría al 27% de la SMYS. Estas bajas tensiones de operación producirán fuga en vez de rotura, a menos que las longitudes superen las 9" en sentido axial con un d/t de 0.9.

PROBETA REVESTIDA

Construcción de defectos

Se retiraron aproximadamente 3 metros de revestimiento en caño 2 y 3, para luego poder mecanizar cinco defectos volumétricos con las ubicaciones y posiciones horarias mostradas en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Características de los defectos realizados en la probeta.

ID Defecto	Pos. Horaria [Hs.]	Distancia a Inicio [m]	Long. Axial [mm]	Long. Transv. [mm]	d/t Inicial	d/t Final
A	11.00	18.40	56	22	0.15	0.69
B	12.00	19.11	60	2	0.15	0.71
C	02.00	35.80	78	22	0.15	0.73
D	12.00	36.76	73	2	0.15	0.74
E	08.30	20.80	280	52	0.15	0.62

El largo y ancho de los defectos se mantuvo constante, mientras que su profundidad se fue incrementando de a 1 mm a través de los ensayos realizados, con el fin de corroborar la sensibilidad de la herramienta en la detección.

Se tomó como punto de referencia un extremo de la cañería y para cada defecto se calculó la pérdida de sección transversal.

El área de la sección de la cañería de 12.75" de diámetro externo se obtiene con la expresión:

$$AreaSección = \frac{\pi}{4} * [DExt^2 - (DExt - 2 * Espesor)^2] \quad \text{Ecuación 3.}$$

Mientras que el área de cada defecto se aproxima como:

$$ÁreaDefecto = LongCircunferencial * Espesor$$

De acuerdo a las especificaciones del fabricante del equipo utilizado en los ensayos, el mismo permite detectar pérdidas de metal a partir del 3% de la sección transversal de la cañería. Sin embargo, en condiciones de bajo ruido, es esperable detectar porcentajes menores. Los ensayos intentarán detectar defectos con $ECL^{27} < \text{al } 1\%$.

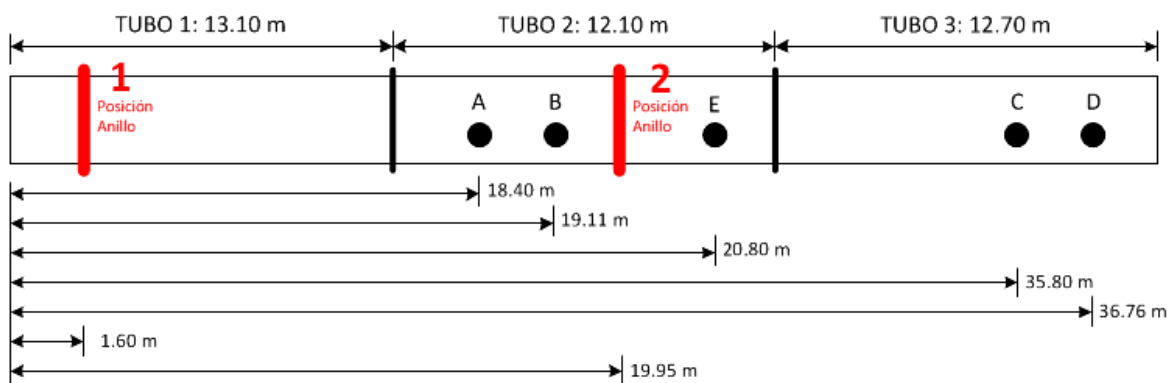


Figura 20. Ubicación y cotas de los defectos realizados en la probeta.

²⁷ Estimated Cross Sectional Loss

Los ensayos experimentales se dividieron en dos etapas, en la primera parte se ensayó con la probeta revestida, y en la segunda con caño desnudo. Para llevar a cabo la primera se retiró una mínima cantidad de revestimiento, en donde se mecanizaron defectos con distintas morfologías. Se verificó la sensibilidad para la detección de los mismos con la herramienta realizando un ensayo incremental en el que se fue aumentando la profundidad de los defectos. Se buscó apreciar el fenómeno de atenuación en el tramo más alejado al punto de disparo, que poseía un revestimiento de mejor calidad y mayor espesor.

Todas las actividades de preparación y configuración de los ensayos como así también de examinación se realizaron según lo descrito en la práctica estándar ASTM E2775 – 11. Este documento ASTM²⁸ posee puntos en común con el publicado por la PHMSA²⁹, para inspección de caños encamisados. Los mismos buscan enmarcar los procedimientos del ensayo para poder maximizar sus resultados.



Figura 21. Ubicación y cotas de los defectos realizados en la probeta. Abajo: Defectos A, B, C, D y E.

Preparación de los Ensayos

Antes de mecanizar los defectos, se efectuó un primer ensayo sobre la probeta para ser utilizado como condición de base. El anillo se instaló a 1.60 m del inicio de la probeta, sobre el caño 1 y se encontró la mejor respuesta ensayando con ondas torsionales a 37 KHz.. Se pudo observar un bajo nivel de ruido, buena respuesta de señal en las soldaduras y la aparición de algunas falsas indicaciones identificadas como "Ignore", producto de reflexiones de onda en el fin de cañería, próximo al anillo. Este tipo de reflexiones suele darse cuando el anillo está muy cerca de soldaduras o fines de cañería.

El anillo posee dos filas de transductores piezoeléctricos para generar ondas torsionales. Cuando el sistema realiza el ensayo en un sentido, en realidad la señal de excitación se propaga en ambos. Tomando el caso de que se está inspeccionando en el sentido Forward, el anillo recibe las reflexiones a medida que la onda se propaga. Las reflexiones que se reciben en el anillo desde el sentido Backward son descartadas por este. Sin embargo, estas últimas reflexiones continúan viajando a través del anillo, ahora en el sentido Forward (poco atenuadas debido a la reflexión del 100% en el fin de cañería próximo) generando nuevas reflexiones que dan lugar a falsas indicaciones. Estas falsas indicaciones pueden identificarse debido a que su localización coincide con la distancia a la característica de la cañería (soldadura, derivación, etc) más la distancia entre el anillo y el fin de cañería.

²⁸ American Society for Testing and Materials

²⁹ U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration

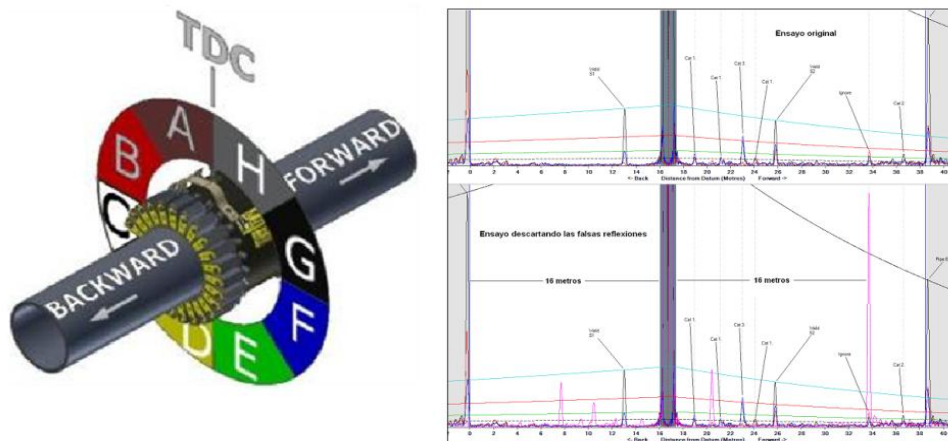


Figura 22. Izq: Ensayo original. Der: Ensayo con corrección de reflexiones espejadas.

El sistema permite mostrar, en color magenta, las señales simétricas invertidas, **Figura 22**, para descartar falsas indicaciones que provengan de reflexiones.

Ensayos

Se realizó el ensayo base obteniendo un bajo nivel de señal desde el fin de cañería más alejado, atribuible a una gran atenuación de las señales en el caño 3, en comparación con las obtenidas en caño 1 y 2. Si no se supiera a priori que el revestimiento del caño 3 es de mejor calidad, esto también podría ser atribuible a la calidad de la soldadura de construcción entre los caños 2 y 3.

El límite del alcance del ensayo se cumple antes de que el nivel de ruido supere los -32 dB de la señal. Lo ideal sería mantener una SNR de 2 a 1. El límite de -32dB es la línea negra punteada de las gráficas.

Se realizaron 7 ensayos y en los mismos se fue verificando la sensibilidad de detección de la herramienta. En todos se ensayaron con ondas longitudinales y torsionales, pero se eligieron las últimas finalmente, por su mejor respuesta.

Los primeros 5 ensayos se realizaron posicionando el anillo en la posición 1, **Figura 20**, a una frecuencia de 37 KHz. y los dos restantes, situándolo en la posición 2, a una frecuencia de 20 KHz., y con menor resolución. La atenuación y resolución de las señales aumenta con la frecuencia. Las frecuencias altas tienen mayor resolución pero atenúan con más fuerza que las frecuencias bajas.

Los defectos A y C se mecanizaron con morfologías similares. Los dos tenían ancho y largo similares representando defectos típicos volumétricos. El defecto A situado más cercano al anillo de disparo y el defecto C en una zona de mucha atenuación considerada fuera del rango, por ese motivo.

Los defectos B y D también poseían similares características. Su relación largo-ancho fue muy superior de 10 a 1 y se los consideró un caso particular de los volumétricos por su morfología de vértices redondeados y su falta de material. Se intenta ver alguna respuesta de amplitud por la componente axial.

Este tipo de defectos podría llegar a darse cuando se daña el ducto con algún elemento de corte o maquinaria y no se da aviso a la operadora. Cuando hablamos de ranuras, raspones, abolladuras o alguna combinación de ellos, tenemos que tener en cuenta los concentradores de tensiones que vuelven más complejo su análisis y en muchos casos requieren aplicar FEA³⁰.

³⁰ Finite Element Analysis

El defecto E representa un caso típico volumétrico pero con un largo-ancho de 5 a 1. Se espera ver similitudes con la detección de A y C.

En el ensayo 7, se agrandó el defecto C y se mecanizó un defecto a la misma distancia de la referencia, incrementado a 100 mm² la PST a esa distancia, **Figura 21**.

Resultados obtenidos

No se observaron cambios de respuesta en amplitud para los defectos B y D, por lo que se considera que no fueron detectados por la herramienta. Con su mayor profundidad, en el ensayo 5, la pérdida de sección transversal teórica de los defectos fue del orden de 0.15 % PST, con un d/t >70%, **Tabla 1-5, ANEXO I**. Esto no hizo posible su detección, ya que la herramienta se basa en cambios de sección transversal. Pensemos lo siguiente, la visibilidad de los defectos con esta morfología son para la herramienta similares a soldaduras longitudinales lineales, y estas, ni los cambios espesor que puedan tener a través de su extensión, son detectables para la técnica, debido al poco porcentaje de área transversal que representan.

El defecto A comienza a ser observable en el ensayo 2, con solo una PST de 0,71%, debido al bajo nivel de ruido del ensayo. Esto no sucedería en una inspección en cañerías enterradas, donde no se conoce a priori la ubicación de los defectos. El defecto fue detectado claramente en todos los ensayos subsecuentes, y se obtuvieron dimensionamientos estimativos correctos de la herramienta. En el ensayo 5, con una PST de 1.53 %, se realizó foco en el defecto, detectando una direccionalidad DIR 3, indicando correctamente que el defecto es altamente localizado, **Figura 23**. La prioridad de seguimiento aplicando la tabla de doble entrada, **Figura 5**, es “Alta” con ponderación 3.

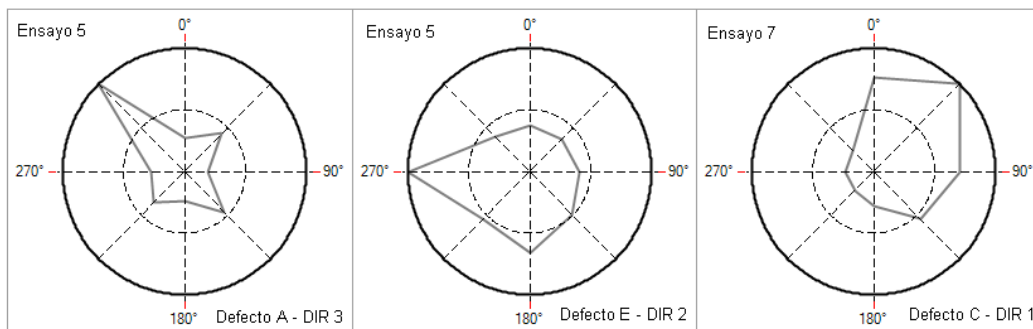


Figura 23. Focalización de los defectos A, E y C.

El defecto C, poseía PST teórica de similar dimensión al defecto A, pero no fue observable hasta la realización del ensayo 6, en el que se desplaza el anillo a una posición más cercana a él y se logra localizar. En este ensayo los valores de dimensionamiento de la herramienta conciden con los PST teóricos calculados.

La atenuación obtenida en el tramo de caño 3 fue -2.6 dB/m cuando en caño 1 y 2 se obtuvo 0.3 dB/m. Esta gran atenuación en tramo 3, fue el motivo por el cual se tuvo que acercar el anillo para obtener más sensibilidad y poder visualizarlo.

Luego de haber realizado la modificación que agrandó la PST en C a 100 mm², se realizó foco en el ensayo 7, **Figura 23**. La indicación fue identificada obteniéndose una direccionalidad DIR 1. Esto concide con las características de la modificación realizada en el defecto C, indicando una indicación poco localizada. Recordemos que se le agregó un defecto alineado transversalmente, **Figura 21**. La prioridad de seguimiento para el defecto C es “Baja” con ponderación 1.

El defecto E se lo identifica correctamente a partir del ensayo 2. En el ensayo 5, con una PST del 3.23 % se pudo realizar el focalizado identificando su posición horaria y caracterizándolo como

DIR 2, **Figura 23**. La prioridad resultante de seguimiento para el defecto E es “Media” con ponderación 2.

Los defectos A, B y E no se detectaron en los ensayos 7 y 8, por estar próximos a la “Zona Muerta”. En ella, la señal transmitida ciega la señal recibida reduciendo de este modo la capacidad de obtener resultados reproducibles.

La zona de efectos de cercanía de campo es la región más allá de la zona muerta, donde la amplitud de las señales recibidas no mantiene relación con la distancia y no es útil para la inspección.

Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en la siguiente tabla de consulta rápida:

Tabla 8. Tabla de consulta rápida con los resultados obtenidos con LRGWUT.

Ensayo\Defecto	A	B	C	D	E
Base	-	-	-	-	-
1	No detecta	No detecta	Fuera rango	No detecta	No detecta
2	0.56%	No detecta	Fuera rango	No detecta	1.46%
3	0.83%	No detecta	Fuera rango	No detecta <td 2.36%	
4	1.74%	No detecta	Fuera rango	No detecta	2.79%
5	3.27% DIR3	No detecta	Fuera rango	No detecta	2.80% DIR 2
6	Zona muerta	Zona muerta	1.89%	No detecta	Zona muerta
7	Zona muerta	Zona muerta	8.48% DIR 1	No detecta	Zona muerta

En la **Figura 24**, se puede observar la detección de los defectos obtenida.

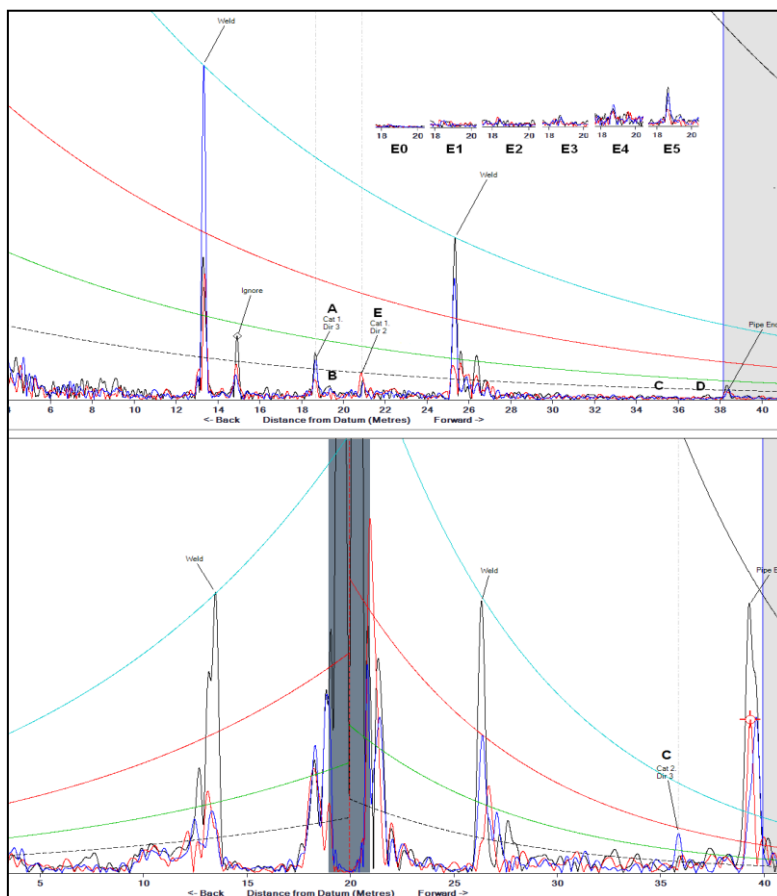


Figura 24. Arriba: Detección de defectos A, B, C, D y E y sensibilidad en A (ensayos 0 a 5). Abajo: Ensayo 7.

PROBETA SIN REVESTIMIENTO

Con el objeto de comprobar que la causa de la atenuación en el caño 3 fue su revestimiento, se realizó una segunda etapa de pruebas que comprendió el retiro total del revestimiento de la probeta, **Figura 25**, y la mecanización de defectos adicionales a los realizados en la serie de ensayos anteriores, para complementar la experiencia con otra morfología de defectos.

A los defectos existentes se le agregaron los defectos F, G, H, I. En esta situación de ensayo, las ondas mecánicas tienen más bajo nivel de ruido y mayor alcance por lo que se obtiene una mayor cantidad de reflexiones en los extremos de la probeta. Esta condición y la longitud acotada, hacen suponer a priori más detecciones espejo.

Otra de las cosas que se intenta comprobar en este ensayo, es la sensibilidad de detección ensayando desde distintas posiciones. Los mismos defectos se intentarán detectar desde dos posiciones, **Figura 26**.



Figura 25. Probeta desnuda para la realización de los ensayos.

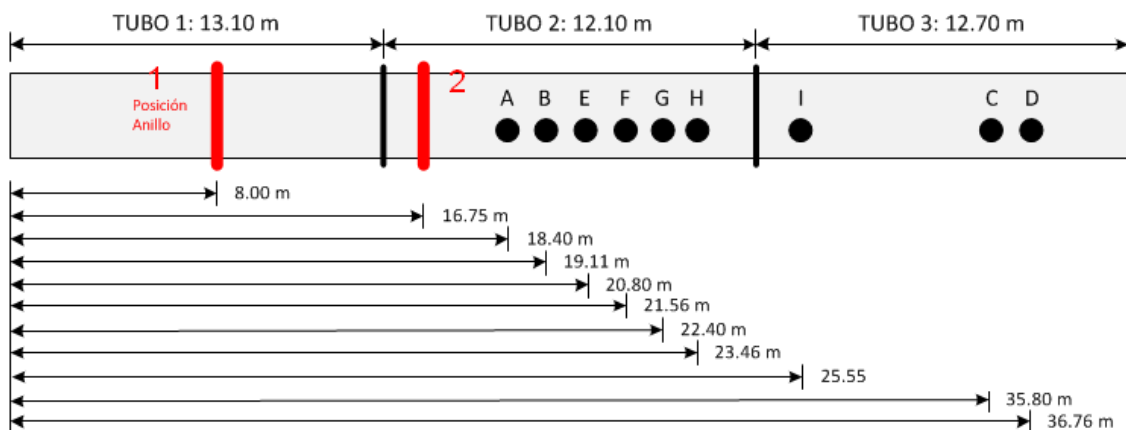


Figura 26. Posición de los defectos y posición del anillo 2° etapa.

En la **Tabla 10** se muestran las características de todos los defectos mecanizados en la probeta.

Tabla 9. Características de los defectos.

ID Defecto	Pos. Horaria [Hs.]	Distancia a Inicio [m]	Long. Axial [mm]	Ancho Transv. [mm]	Prof. [mm]	% Secc. Tranv.
A	11.00	18.40	56	22	4.51	1,53
B	12.00	19.11	60	2	4.62	0,14
C	2.00	35.80	78	100	4.73	7,30
D	12.00	36.76	73	2	4.83	0,15
E	8.30	20.80	280	52	4.03	3,23
F	12.00	21.56	162	2	2.40	0,07
G	12.00	22.40	3	72	3.50	3,89
H	2.00	23.46	180	125	3.20	6,17
I	1.00	25.55	450	2	2.30	0,07

A continuación en **Figura 27**, se muestran los defectos mecanizados en esta etapa.



Figura 27. Defectos F, G, H, I.

Ensayos

Se realizaron dos ensayos adicionales con la probeta sin revestimiento, en las posiciones de la **Figura 26**, para poder verificar la ubicación y severidad de los defectos mecanizados. Para cada ensayo se tomó como punto de referencia un extremo de la cañería.

En los ensayos se verificó la sensibilidad de detección y se ensayó con ondas longitudinales y torsionales, optando por las últimas por su mejor respuesta bajo las condiciones de ensayo, a una frecuencia de 37 KHz..

A los defectos existentes se le agregaron los defectos F, G, H, I.

El defecto F, **Figura 27**, fue mecanizado con la intención de poner en evidencia el ángulo de detección de la herramienta. Pudimos apreciar en la etapa 1 que uno de los peores casos para la detección, es el de los defectos con gran componente axial y poca dimensión transversal. El mejor caso se da cuando el defecto tiene solo componente transversal. Por eso se decidió realizar una entalla con poca componente transversal pero con ángulo de 45° y verificar si es apreciable. Esto podría representar un defecto en una soldadura helicoidal.

El defecto G, sería el caso más fácil de detectar para la herramienta, ya que solo posee componente transversal. Estos casos son los menos problemáticos cuando se calcula la presión de falla, ya que casi no posee componente axial. Los métodos utilizados para evaluar la fuerza remanente se basan en la longitud axial y profundidad máxima del defecto.

Se mecaniza un defecto H como variante del anterior, de igual dimensión transversal pero agregando la componente axial. Se intenta verificar diferencias y similitudes con G entre amplitudes resultantes.

El defecto I es un defecto muy largo con muy poca componente transversal. Son variantes de B y D pero de mayor longitud. Esta morfología de defectos no corresponde a los producidos por corrosión.

Resultados obtenidos

Los defectos B y D tampoco fueron detectados en esta etapa.

Los defectos F (45°) e I (gran longitud) denotan un cambio mínimo de amplitud, pero dada su poca magnitud se consideran no detectados, **Figura 29**. En un ensayo real donde no se sabe la ubicación de los defectos se consideraría ruido.

Se detectaron correctamente los defectos A, E, G, H y G pudiendo realizar focalización y las priorizaciones de inspección, **Anexo II**. Las ubicaciones horarias obtenidas fueron correctas.

En las gráficas de reflexión, se esperaba mayor respuesta en el defecto H que en G, pero contrariamente se redujo la amplitud. Se cree que la componente axial, pudo haber influido. Esto merece más investigación y se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

De los dos ensayos se toman los resultados de priorización más conservativos, que categoriza a la indicación A como Alta (3), C Media (2), E Alta (3), G Alta (9) y H Alta (3).

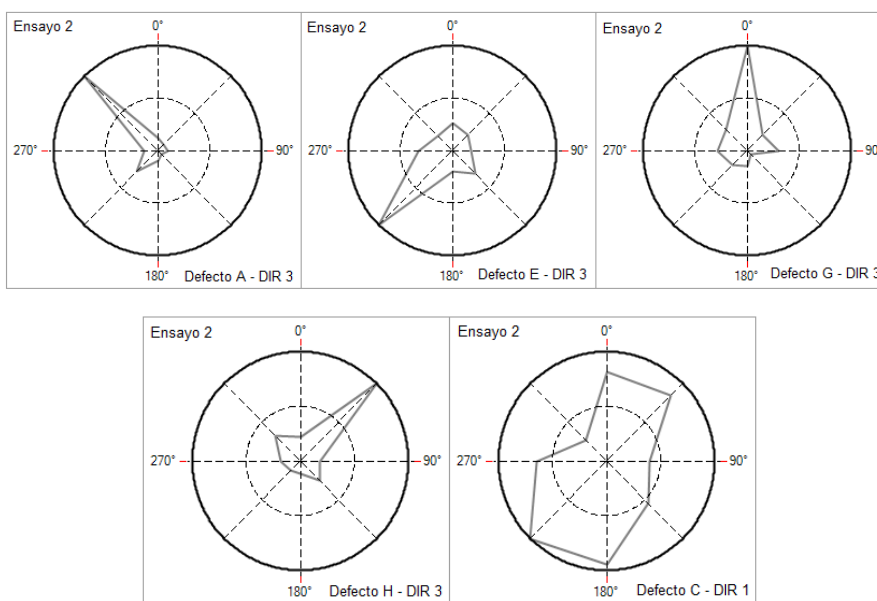


Figura 28. Foco de los defectos.

Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en la siguiente tabla de consulta rápida:

Tabla 10. Tabla de consulta rápida de resultados obtenidos con GWUT.

Ensayo\Defecto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	3.03 %	No	6.01 %	No	4.24 %	No	4.42 %	5.31 %	No
2	2.91%	No	6.77 %	No	4.66 %	No	3.63 %	6.30 %	No

A continuación en **Figura 29**, se puede observar los gráficos de señal obtenidos en ambos ensayos.

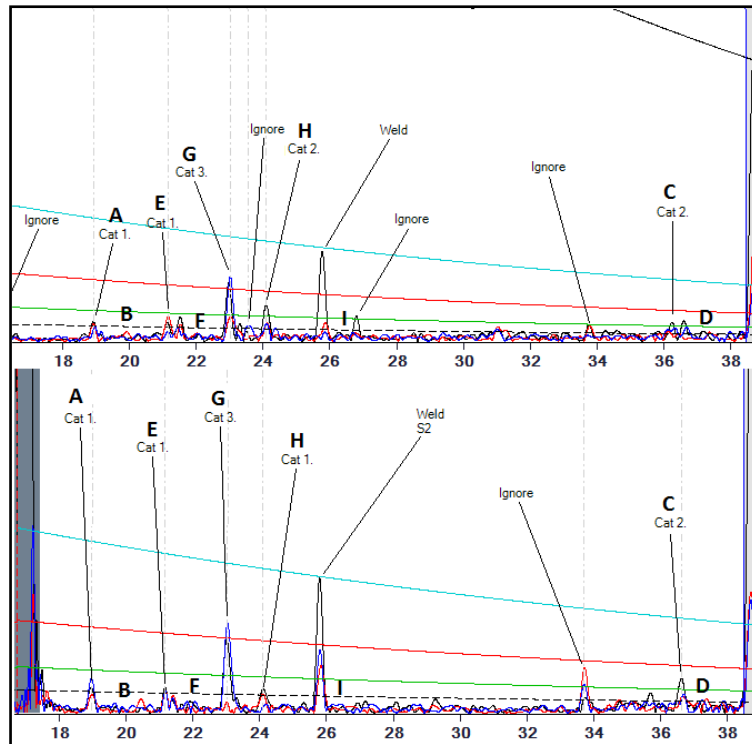


Figura 29. Gráfica de ensayos en probeta desnuda. Arriba: Ensayo 1. Abajo: Ensayo 2.

ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Ensayos de Campo

Los resultados obtenidos en campo con la herramienta LRGWUT fueron satisfactorios con respecto a la evaluación de corrosión externa. La herramienta incrementó la longitud lineal de cañería inspeccionada en un 200%. La metodología fue útil en sitios de difícil acceso donde no son eficaces las herramientas de inspección indirecta convencional. Debido a que fue aplicada en cañerías no instrumentables, se la considera un buen complemento tanto para la metodología ECDA como para ICDA.

En los sitios de difícil acceso donde se la utilizó, las cañerías poseían mayor profundidad de tapada y esto sumado a que las líneas discurren por zonas densamente pobladas, hace que las excavaciones se vuelvan más complejas.

Con la herramienta se obtuvo un mayor alcance de lo esperado, debido a la pobre adherencia del revestimiento a la cañería en los sitios ensayados.

Los defectos detectados en campo con la herramienta fueron verificados mediante evaluación directa, corroborando su existencia. Se considera que la herramienta fue efectiva en la detección. Los defectos poseían rango PST entre 1% y 1.7% en cañería de 24 pulgadas y si bien el orden de priorización no condice con la evaluación de fuerza remanente, las ponderaciones sí.

Las soldaduras helicoidales no fueron impedimento para obtener un buen rango y sensibilidad en los ensayos de campo, bajo esas condiciones.

Ensayos Experimentales

Mediante metodología experimental, se puso a prueba la herramienta y se pudieron conocer el alcance y las limitaciones de la misma.

En los ensayos experimentales se obtuvo la medición de atenuación por tramos y se pudo observar una acentuada diferencia entre las pendientes de atenuación del tramo constituido por caño con revestimiento delgado y tramo con revestimiento grueso, como así también entre el de cañería revestida y sin revestir.

En la **Tabla 11** se muestran las mediciones de atenuación para el tramo de cañería con revestimiento bicapa, tricapa y caño sin revestimiento.

Tabla 11. Mediciones de atenuación por tramos.

Condición	Frecuencia	Atenuación [dB/m]
Revestimiento Delgado	20 KHz.	-0.2
Revestimiento Delgado	37 KHz.	-0.3
Revestimiento Grueso	20 KHz.	-1.1
Revestimiento Grueso	37 KHz.	-2.6
Sin Revestimiento	20 KHz.	-0.1
Sin Revestimiento	37 KHz.	-0.2

En la tabla puede observarse como aumenta la atenuación, con el aumento de la frecuencia de ensayo y se visualiza claramente como este aumento es incluso mayor, cuando la capa de revestimiento es más gruesa.

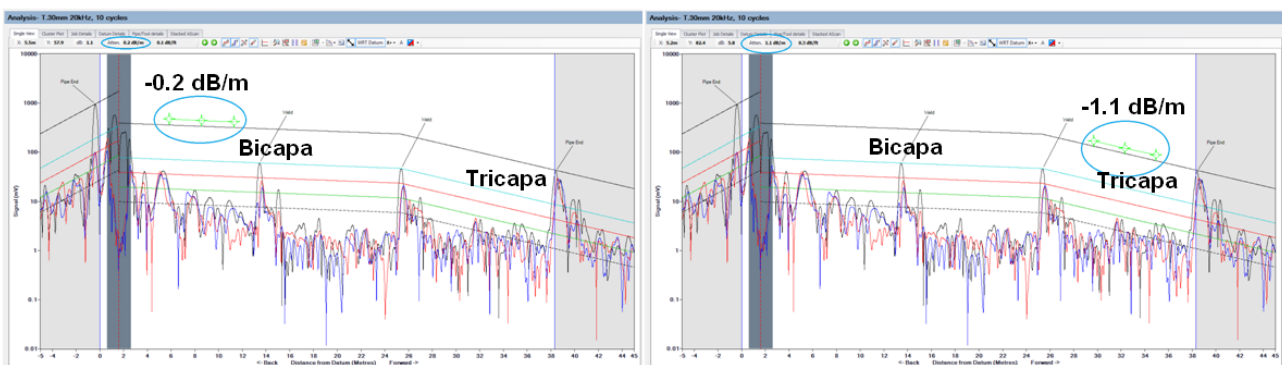


Figura 30. Ensayo a 20 KHz. Izq: Tramo con revestimiento delgado -0.2 dB/m. Der: Tramo con revestimiento grueso -1.1 dB/m.

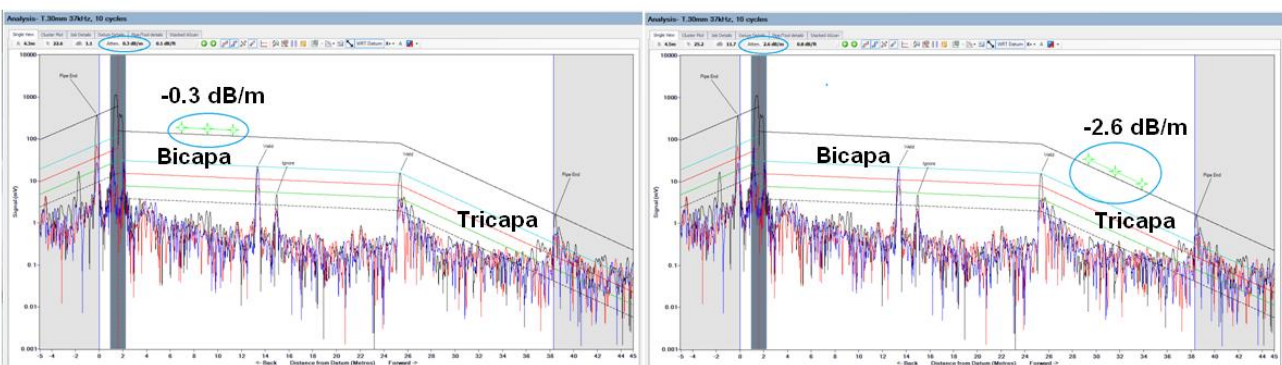


Figura 31. Ensayo a 37 KHz. Izq: Tramo con revestimiento delgado -0.3 dB/m. Der: Tramo con revestimiento grueso -2.6 dB/m.

Una vez retirado el revestimiento los valores de atenuación bajan en los dos tramos, pero el cambio es más notable en el tramo revestido que pasa de -2.6 dB/m a -0.2 dB/m.

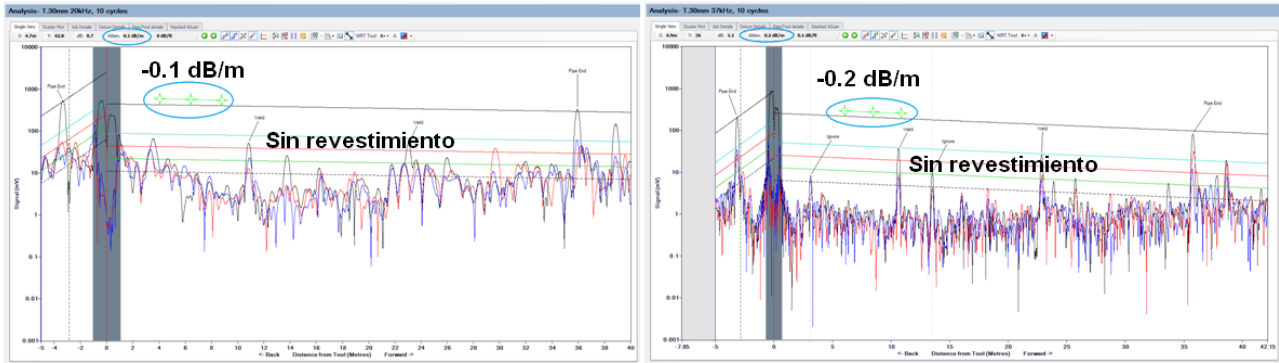


Figura 32. Izq: Ensayo a 20 KHz. tramo sin revestimiento -0.1 dB/m. Der: Ensayo a 37 KHz. tramo sin revestimiento -0.2 dB/m.

Con esto podemos afirmar que la atenuación en el caño 3 fue mayormente causada por la mejor calidad del revestimiento. Y esto es algo a tener cuenta, ya que la atenuación nos puede reducir notablemente el rango de ensayo. En caños encamisados es importante lograr un rango que pueda asegurar la evaluación del tramo completo. Si ensayando desde los dos extremos no se llegara a cubrir la totalidad del segmento con una relación SNR de por lo menos 2 a 1, la prueba no podría darse por válida.

En el ensayo con cañería revestida, el aumento de sensibilidad fue comprobado al acortar la distancia desde el anillo hasta el defecto. Al acercar el anillo al defecto C, se consiguió detectarlo. Y este punto es importante, ya que si se está ensayando desde un extremo el sitio de difícil acceso, llegando con poca señal al extremo opuesto, sería importante poder realizar otro disparo allí buscando mayor sensibilidad opuesta al disparo original. Esto evitaría la no detección de algún defecto por disminución de sensibilidad.

En los ensayos experimentales se realizaron entallas de gran longitud y poco ancho simulando las peores condiciones de detección para la herramienta. Estos casos no son casos típicos de defectos volumétricos producidos por corrosión. Generalmente, se estima su longitud extrayendo la componente axial para luego poder realizar los cálculos de fuerza remanente. Estos defectos se realizaron para poner a prueba la sensibilidad de la herramienta y porque no se descarta el caso de un daño de terceros con estas características del cuál no se dio aviso, y no se tiene conocimiento.

Los defectos B, D, F, I poseían gran componente axial y muy poca sección transversal, $PST < 0,16\%$, por lo que no fueron detectados por la herramienta. El factor de seguridad calculado para cada una de ellos respectivamente fue: 2.83, 2.52, 3.19 y 3.06.

El defecto más comprometido no detectado sería el D con factor 2.52. A continuación se realiza una comparativa de prioridades otorgadas por LRGWUT vs. las respectivas presiones de falla de los defectos encontrados.

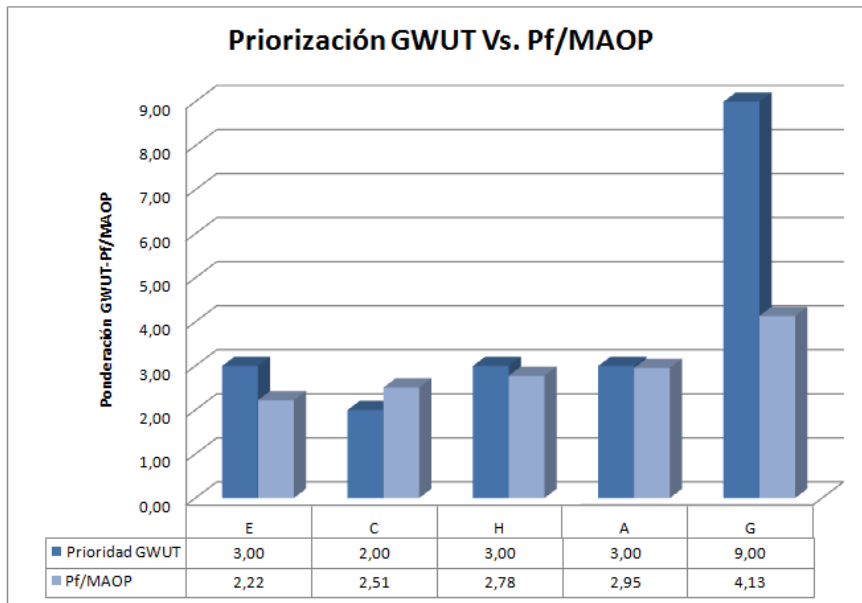


Figura 33. Comparativa de prioridades calculadas para cada defecto encontrado de la probeta.

Se puede observar que la mayor ponderación está otorgada por la herramienta LRGWUT al defecto transversal G, defecto que posee el mayor factor de seguridad. Esto era de esperar ya que el cálculo de las presiones de falla basa su cálculo en la longitud axial del defecto y profundidad, y LRGWUT en la componente transversal y profundidad.

Si suponemos que todos los defectos encontrados en nuestra probeta mantienen su relación largo-ancho proporcional y un d/t del 50%, podemos establecer la siguiente comparativa:

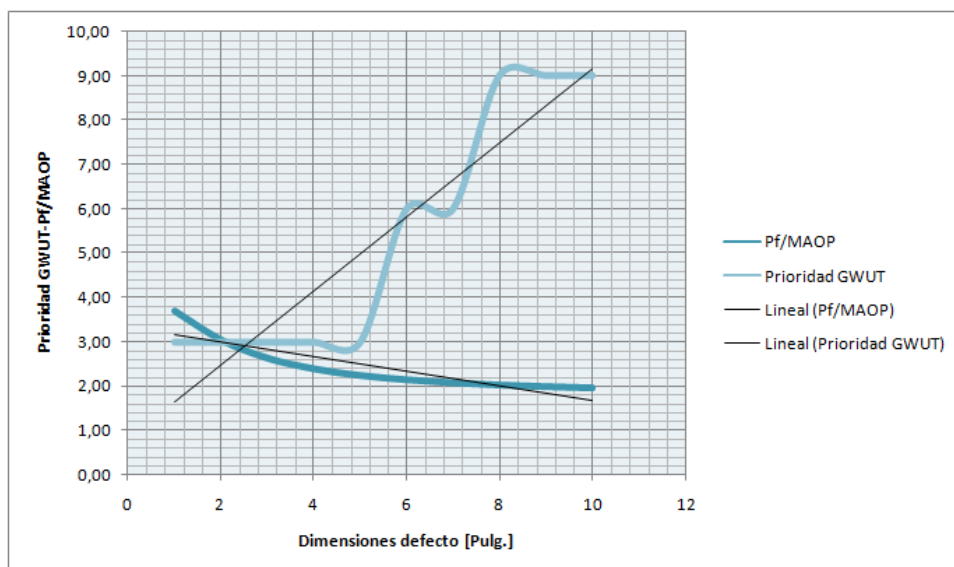


Figura 34. Prioridades GWUT y Factor de Seguridad en defectos simétricos en probeta de 12".

Podemos decir entonces que si se mantiene la relación largo ancho proporcional, la priorización de los defectos que realiza la herramienta es congruente con los cálculos de fuerza remanente. Sin olvidar que la priorización GWUT se basa en cuánta área transversal cambió y los cálculos de fuerza remanente, en la longitud axial y profundidad.

Si bien la técnica recomienda evaluar todas las indicaciones, e inclusive defectos del orden del 1% de PST, es necesario establecer un umbral mínimo de sensibilidad para los sitios de difícil acceso y poder diferenciar actuaciones inmediatas de monitoreadas. Basados en las experiencias de campo y experimentales de este trabajo, se considera que la detección y ubicación de los defectos con PST de 3% fueron realizadas correctamente. Se puede decir entonces que con esa sensibilidad, bajo estas condiciones de ensayo y siguiendo el protocolo de inspección, se aseguraría la detección. Como se sabe que las detecciones fueron realizadas en un ambiente artificial de poco ruido, difícilmente reproducible en los ensayos de campo, se toma la decisión de establecer un umbral mínimo de 5% para la realización de las siguientes comprobaciones.

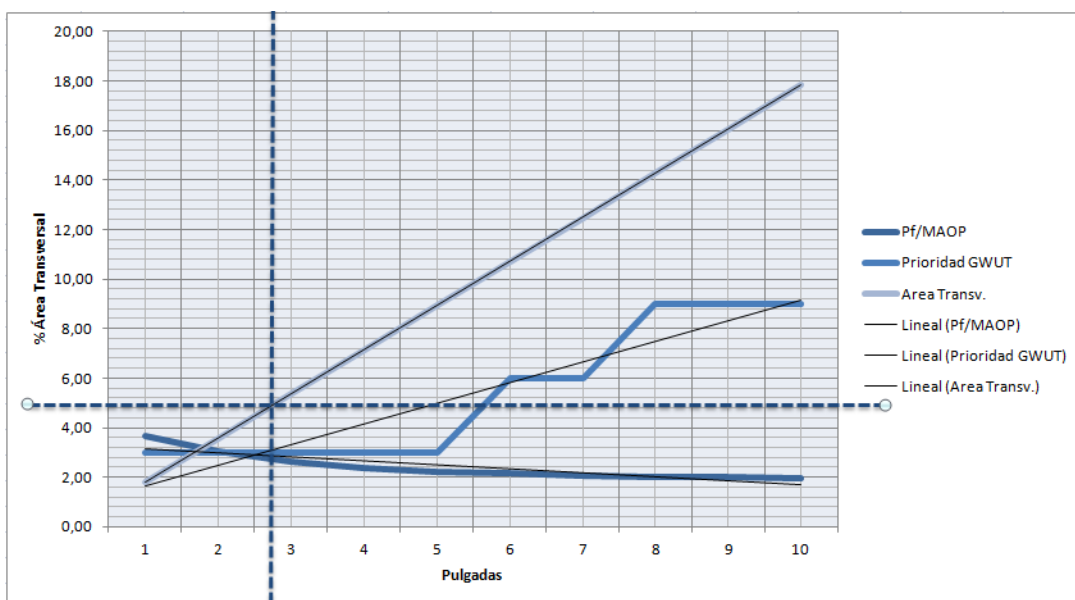


Figura 35. Tamaño de defecto simétrico para PST del 5% en probeta experimental.

En **Figura 35** puede observarse que para un umbral de PST de 5 % todas las fallas menores a 2.7 pulgadas transversales, no estarían contenidas en la selección.

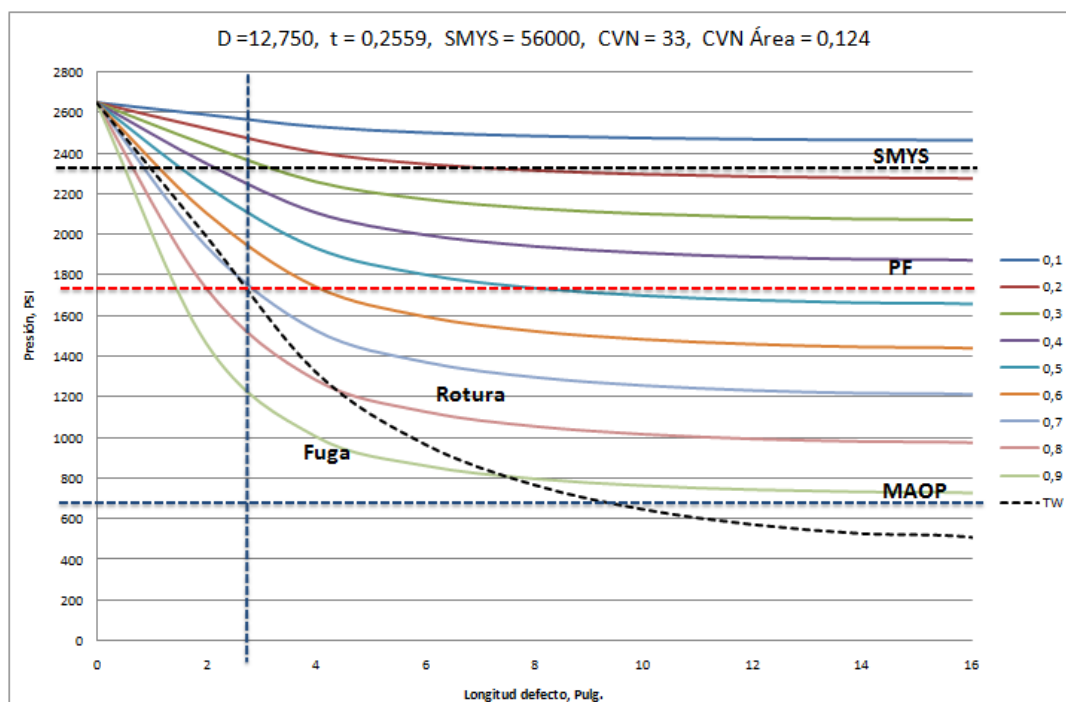


Figura 36. Curvas de Pf para probeta de 12".

Podemos observar en la **Figura 36**, que para esa longitud axial, la rotura se produce a aproximadamente 1700 PSI. Valor que contiene la MAOP en 2.4 veces, resultando ser un valor conservador para esta prueba, bajo estas condiciones.

A continuación en **Figura 37**, se observa una matriz que posee las pérdidas de sección transversal para distintos tamaños de falla y profundidad. El color azul representa la división de zonas con PST mayores-iguales y menores al 5%.

[%Perim/2] / d/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,00%	0,05	0,10	0,15	0,20	0,26	0,31	0,36	0,41	0,46
2,00%	0,10	0,20	0,31	0,41	0,51	0,61	0,71	0,82	0,92
3,00%	0,15	0,31	0,46	0,61	0,77	0,92	1,07	1,22	1,38
4,00%	0,20	0,41	0,61	0,82	1,02	1,22	1,43	1,63	1,84
5,00%	0,26	0,51	0,77	1,02	1,28	1,53	1,79	2,04	2,30
6,00%	0,31	0,61	0,92	1,22	1,53	1,84	2,14	2,45	2,76
7,00%	0,36	0,71	1,07	1,43	1,79	2,14	2,50	2,86	3,21
8,00%	0,41	0,82	1,22	1,63	2,04	2,45	2,86	3,27	3,67
9,00%	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	2,76	3,21	3,67	4,13
10,00%	0,51	1,02	1,53	2,04	2,55	3,06	3,57	4,08	4,59
12,00%	0,61	1,22	1,84	2,45	3,06	3,67	4,29	4,90	5,51
14,00%	0,71	1,43	2,14	2,86	3,57	4,29	5,00	5,71	6,43
16,00%	0,82	1,63	2,45	3,27	4,08	4,90	5,71	6,53	7,35
18,00%	0,92	1,84	2,76	3,67	4,59	5,51	6,43	7,35	8,27
20,00%	1,02	2,04	3,06	4,08	5,10	6,12	7,14	8,16	9,18
25,00%	1,28	2,55	3,83	5,10	6,38	7,65	8,93	10,20	11,48
30,00%	1,53	3,06	4,59	6,12	7,65	9,18	10,72	12,25	13,78
40,00%	2,04	4,08	6,12	8,16	10,20	12,25	14,29	16,33	18,37
50,00%	2,55	5,10	7,65	10,20	12,76	15,31	17,86	20,41	22,96
60,00%	3,06	6,12	9,18	12,25	15,31	18,37	21,43	24,49	27,55
70,00%	3,57	7,14	10,72	14,29	17,86	21,43	25,00	28,57	32,15
80,00%	4,08	8,16	12,25	16,33	20,41	24,49	28,57	32,66	36,74
90,00%	4,59	9,18	13,78	18,37	22,96	27,55	32,15	36,74	41,33
100,00%	5,10	10,20	15,31	20,41	25,51	30,61	35,72	40,82	45,92

Figura 37. Matriz de PST para defectos que se incrementan simétricamente en %Área y %d/t para probeta de 12”.

[%Perim/2] / d/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,00%	4,14	4,14	4,13	4,13	4,13	4,12	4,12	4,11	4,09
2,00%	4,13	4,13	4,12	4,11	4,09	4,08	4,05	4,01	3,95
3,00%	4,13	4,11	4,09	4,07	4,04	4,00	3,95	3,87	3,74
4,00%	4,12	4,09	4,06	4,02	3,97	3,91	3,82	3,70	3,50
5,00%	4,11	4,07	4,02	3,97	3,90	3,81	3,68	3,51	3,25
6,00%	4,10	4,04	3,98	3,91	3,82	3,70	3,54	3,33	3,01
7,00%	4,08	4,02	3,94	3,85	3,73	3,59	3,40	3,15	2,80
8,00%	4,07	3,99	3,90	3,79	3,65	3,48	3,27	2,99	2,60
9,00%	4,06	3,97	3,86	3,73	3,57	3,38	3,15	2,84	2,44
10,00%	4,05	3,94	3,82	3,67	3,50	3,29	3,04	2,71	2,29
12,00%	4,02	3,89	3,74	3,57	3,37	3,13	2,84	2,50	2,06
14,00%	4,00	3,85	3,68	3,48	3,26	3,00	2,69	2,33	1,89
16,00%	3,99	3,81	3,62	3,41	3,16	2,89	2,57	2,19	1,76
18,00%	3,97	3,78	3,58	3,34	3,09	2,80	2,47	2,09	1,65
20,00%	3,96	3,75	3,53	3,29	3,02	2,72	2,39	2,01	1,57
25,00%	3,93	3,70	3,46	3,19	2,90	2,58	2,24	1,86	1,44
30,00%	3,91	3,66	3,40	3,12	2,82	2,49	2,14	1,76	1,35
40,00%	3,88	3,61	3,33	3,03	2,71	2,38	2,02	1,65	1,25
50,00%	3,87	3,58	3,29	2,98	2,65	2,31	1,96	1,59	1,19
60,00%	3,86	3,56	3,26	2,94	2,62	2,27	1,92	1,55	1,16
70,00%	3,85	3,55	3,24	2,93	2,59	2,25	1,90	1,53	1,14
80,00%	3,85	3,55	3,24	2,91	2,58	2,24	1,88	1,51	1,13
90,00%	3,85	3,55	3,23	2,91	2,58	2,24	1,88	1,51	1,13
100,00%	3,85	3,55	3,24	2,92	2,59	2,25	1,89	1,52	1,14

Figura 38. Matriz de Pf/MAOP para defectos que se incrementan simétricamente en %Área y %d/t para probeta de 12”.

En la **Figura 38** análogamente se ponen en evidencia los valores de Pf/MAOP de las zonas delimitadas anteriormente.

Basados en los resultados expuestos definimos un umbral mínimo para evaluación directa igual a 5% PST y un umbral de monitoreadas, para defectos mayores o igual de 3% PST y menores a 5%.

CONCLUSIONES

Luego haber analizado los resultados obtenidos de las intervenciones de campo y de los ensayos experimentales con la herramienta LRGWUT se concluye:

- La inspección por ondas guiadas es una herramienta de visualización que permite ubicar la distancia y posición horaria de defectos volumétricos producidos por corrosión, con ciertas limitaciones.
- La herramienta es útil para utilizarla como complemento en metodologías ECDA e ICDA, en líneas de transmisión no instrumentables.
- Dado que los métodos utilizados para evaluar la fuerza remanente de cañerías corroídas requieren poder determinar la longitud axial y profundidad máxima del defecto, los ensayos de ondas guiadas no proporcionan los datos necesarios para evaluar directamente un área de corrosión.
- La longitud total de línea de transmisión no instrumentable evaluada por metodología DA es considerablemente mayor, si se consideran los metros de cañería visualizados con la herramienta en cada inspección.
- La componente transversal es un factor esencial para que la herramienta pueda detectar las indicaciones. Fallas con componente transversal muy pequeña ($PST < 0.16\%$) y componente axial grande no fueron detectadas por la herramienta.
- La atenuación disminuye considerablemente el rango y la sensibilidad de la herramienta.
- Los revestimientos bituminosos con poca adherencia atenúan menos que los que poseen buena adherencia.
- En sitios de difícil acceso las excavaciones se vuelven más complejas por la profundidad de tapada que presenta la cañería, y en ciertas ocasiones, el entorno de excavación en zonas densamente pobladas.
- El dimensionamiento de defectos con esta tecnología es posible, pero limitado por ser una metodología de visualización.
- Defectos con PST igual o mayor de 5% deberán ser inspeccionados directamente.
- Defectos con PST mayor de 3% y menor que 5% deberán ser monitoreados.

TAREAS PENDIENTES

Realización de más estudios de validación y detección, para avanzar en la capacidad de la herramienta en la determinación de la longitud axial de las indicaciones.

Realizar ensayos en caños camisa rellenos con cera microcristalina, verificando atenuación y alcance obtenido.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Miguel Grygianiec, Guillermo Lanzillotti y Marcelo Marzarini de Gas Natural Fenosa S.A., por su apoyo y colaboración en este proyecto.

REFERENCIAS

1. *NAG 100 – Normas Argentinas mínimas de Seguridad para el Transporte y Distribución de Gas Natural y otros gases por cañerías – Año 1993.*
2. *NAG 100 – Parte “O” – Gerenciamiento de la Integridad de Líneas de Transmisión – Año 2010.*
NACE SP0502 – Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology – Año 2010.
3. *ASTM E2775 – Standard Practice for Guided Wave Testing of Above Ground Steel Pipework Using Piezoelectric Effect Transduction – Año 2011.*
4. *ISO 9712 – Non-destructive testing / Qualification and certification of personnel – Año 2005.*
5. *John S. Zurcher, J. Andrew Drake, Keith G. Leewis – IPC02-27033 – American Society of Mechanical Engineers, B31.8 Committee Integrity Management Standard Supplement (B31.8S) – Año 2002.*
6. *Guided Wave Check List 110107 - Guided Wave UT Target Items for Go-No Go Procedures – PHMSA – US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.*
7. *Guided Wave Check List 020606 - In Groups – PHMSA - US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.*
8. *James Carroll, Dale Lindemuth, Olagoke Olabisi, David Kroon, Marlane Miller, Larry Rankin PHMSA – Sponsored Research: Improvements to ECDA Process Cased Pipe ECDA Methodology – Año 2010.*
9. *NACE SP0206 – Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Pipelines Carrying Normally Dry Natural Gas (DG-ICDA) – Año 2006.*
10. *Jyin-Wen Cheng, Shih-Kuang Yang, Ping-Hung Lee, Chi-Jen Huang – Attenuation of Guided Wave Propagation by the Insulation Pipe – 2012.*
11. *Maureen Droessler – Guided Wave Evaluation as Hydrotest Equivalent – Operations Technology Development – Año 2010*
12. *S. Lebsack – Guided Wave Ultrasonic Inspection & Verification Studies of Buried Pipelines – Lebsack & Associates.*
13. *Raymond R. Fessler – Pipeline Corrosion Final Report Submitted to U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration Office of Pipeline Safety Integrity Management Program – DTRS56-02-D-70036 – 2008.*
14. *ASME B31.8S - Managing System Integrity of Gas Pipelines – 2010*
15. *CFR-Title49-Vol3-Part192 – Subpart O – Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, DOT – 2010.*
16. *Introduction to Ultrasonic Guided Waves – Plant Integrity Limited - UK*
17. *Guidelines for Integrity Assessment of Cased Pipe for Gas Transmission Pipelines in HCAs – Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, DOT – 2010*
18. *Hernan Rivera, Carlos Mares, Jorge Canto, Carlos G. López, Cecil H. Knight, Jose H. Jimenez Gonzalez, Guadalupe Corrales Gonzalez, Jorge A. Ascencio, and Lorenzo Martínez – Guided Waves Methodology application in the Analysis of Pipeline Integrity of docks along pacific coast and Mexico Gulf - Paper No. 10067 – 2010.*
19. *Joseph M. Galbraith and George C. Williamson - Practical Considerations for Users of Guided Wave Ultrasonic Testing – 07164 – NACE - 2007.*

ANEXO I

TABLAS ENSAYOS PROBETA REVESTIDA

Ensayo N°: 1

Defectos mecanizados: A, B, C, D, E

Frecuencia: 37 KHz.

Modo de Onda: Torsional

Posición del Anillo: 1

Observaciones: Los defectos no fueron detectados por la herramienta, debido a la poca pérdida de sección transversal que presentaban.

Tabla 1-1. Ensayo 1.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT
A	1	0,34	No	-	-
B	1	0,03	No	-	-
C	1	0,34	No	-	-
D	1	0,03	No	-	-
E	1	0.80	No	-	-

Ensayo N°: 2

Defectos mecanizados: A, B, C, D, E

Frecuencia: 37 KHz.

Modo de Onda: Torsional

Posición del Anillo: 1

Observaciones: Los defectos A y E comienzan a ser observables debido al bajo nivel de ruido del ensayo, esto no sucedería en una inspección donde no se conoce a priori la ubicación de los defectos. Los mismos se detectan y caracterizan.

El defecto C, con pérdida de sección transversal teórica similar al defecto A, no es observable debido a la atenuación de las señales en el caño 3 y consecuente disminución del rango.

Los defectos B y D no son observables debido a su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

Tabla 1-2. Ensayo 2.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]
A	2,10	0,71	Si	0.56	18.18
B	1,95	0,06	No	-	-
C	2,07	0,70	No	-	-
D	2,26	0,07	No	-	-
E	1.92	1.54	Si	-	20.10

Ensayo N°: 3

Defectos mecanizados: A, B, C, D, E

Frecuencia: 37 KHz.

Modo de Onda: Torsional

Posición del Anillo: 1

Observaciones: Se detecta y caracteriza el defecto A y E.

El defecto C, no es observable debido a la atenuación en el caño 3.

Los defectos B y D no son observables por su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

Tabla 1-3. Ensayo 3.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]
A	3,14	1,07	Si	0.83	18.47
B	2,94	0,09	No	-	-
C	3,06	1,04	No	-	-
D	2,97	0,09	No	-	-
E	2.83	2.27	Si	2.36	20.30

Ensayo N°: 4**Defectos mecanizados:** A, B, C, D, E**Frecuencia:** 37 KHz.**Modo de Onda:** Torsional**Posición del Anillo:** 1**Observaciones:** Se detectan y caracterizan los defectos A y E.

El defecto C, no es observable debido a la atenuación en el caño 3.

Los defectos B y D no son observables por su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

Tabla 1-4. Ensayo 4.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]
A	3,53	1,20	Si	1.74	18.52
B	3,34	0,10	No	-	-
C	3,61	1,23	No	-	-
D	3,90	0,12	No	-	-
E	3.51	2.82	Si	2.79	19.90

Ensayo N°: 5**Defectos mecanizados:** A, B, C, D, E**Frecuencia:** 37 KHz.**Modo de Onda:** Torsional**Posición del Anillo:** 1**Observaciones:** Se detecta claramente y caracteriza el defecto A y E.

El defecto C, no es observable debido a la atenuación en el caño 3.

Los defectos B y D no son observables por su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

El focalizado identifica la posición horaria de A y E, se caracteriza al defecto A como DIR 3 y al defecto E como DIR 2.

Tabla 1-5. Ensayo 5.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]	Posición Horaria GWUT [Hs.]	Cat. GWUT	Foco	Prioridad de Seg. GWUT
A	4,51	1,53	Si	3.27	18.45	10.30	1	DIR 3	Alta - 3
B	4,62	0,14	No	-	-	-	-	-	-
C	4,73	1,61	No	-	-	-	-	-	-
D	4,83	0,15	No	-	-	-	-	-	-
E	4,03	3.23	Si	2.80	20.14	9.00	1	DIR 2	Media - 2

Ensayo N°: 6**Defectos mecanizados:** A, B, C, D, E**Frecuencia:** 20 KHz.

Modo de Onda: Torsional

Posición del Anillo: 2

Observaciones: Se colocó a 19.95 m del inicio de la probeta, sobre el caño 2, en la posición 2, con objeto de intentar detectar el defecto C ensayando desde una posición más cercana con mayor sensibilidad y menor atenuación.

Se obtuvo la mejor respuesta con ondas torsionales a 20 KHz., en donde puede apreciarse que a esta frecuencia, con la menor resolución por ser la más baja posible, el defecto C pudo ser observado.

Los defectos A, B y E no se detectan por estar próximos a la zona muerta.

El defecto D no es observable por su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

Tabla 1-6. Ensayo 6.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]
C	4,73	1,61	No	1.89	35.46
D	4,83	0,15	No	-	-

Ensayo N°: 7

Defectos mecanizados: A, B, C, D, E

Frecuencia: 20 KHz.

Modo de Onda: Torsional

Posición del Anillo: 2

Observaciones: Se mecanizó un defecto que aumenta el ancho del defecto C llevando a 100 mm² su PST. El mismo es identificado y se logró hacer foco en él, obteniéndose una direccionalidad DIR 1.

Los defectos A, B y E no se detectan por estar dentro de la zona muerta.

El defecto D no es observable por su poca pérdida de sección transversal, como consecuencia de su morfología.

Tabla 1-7. Ensayo 7.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]	Posición Horaria GWUT [Hs.]	Cat. GWUT	Foco GWUT	Prioridad de Seg. GWUT
C	4,73	7,3	No	8.48	35.46	2.00	1	DIR 1	Baja - 1
D	4,83	0,15	No	-	-	-	-	-	-

ANEXO II

TABLAS ENSAYOS PROBETA DESNUDA

Ensayo N°: 1**Defectos mecanizados:** A, B, C, D, E, F, G, H, I**Frecuencia:** 37 KHz.**Modo de Onda:** Torsional**Posición del Anillo:** 1

Observaciones: Se realizó el primer ensayo colocando el anillo en la cañería 1 de la probeta, a 8 metros de su inicio. Se observaron algunas indicaciones espurias debido a reflexiones de la señal en el fin de cañería muy próximo. Pudieron identificarse claramente los defectos A, C, E, G y H. Se obtuvieron las curvas de distancia amplitud, focos y se ubicó correctamente la posición horaria de los defectos.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]	Posición Horaria GWUT [Hs.]	Cat. GWUT	Foco	Prioridad de Seg. GWUT
A	4.51	1,53	Si	3.03	18.76	12.00	1	DIR 1	Baja – 1
B	4.62	0,14	No	-	-	-	-	-	-
C	4.73	7,30	Si	6.01	36.02	01.30	2	DIR 1	Media – 2
D	4.83	0,15	No	-	-	-	-	-	-
E	4.03	3,23	Si	4.24	20.93	08.00	1	DIR 1	Baja – 1
F	2.40	0,07	No	-	-	-	-	-	-
G	3.50	3,89	Si	4.42	22.79	12.00	3	DIR 1	Alta – 3
H	3.20	6,17	Si	5.31	23.33	03.00	2	DIR 1	Media – 2
I	2.30	0,07	No	-	-	-	-	-	-

Ensayo N°: 2**Defectos mecanizados:** A, B, C, D, E, F, G, H, I**Frecuencia:** 37 KHz.**Modo de Onda:** Torsional**Posición del Anillo:** 2

Observaciones: Se realizó el ensayo colocando el anillo en cañería 2, a 16.75 metros del inicio de la probeta. En el ensayo pudieron identificarse claramente los defectos A, C, E, G y H. Se pudieron realizar focos ubicando correctamente la posición horaria de los defectos.

ID Defecto	Prof. [mm]	% Sección Transv.	Detectado	% Sección Transv. GWUT	Distancia GWUT [m]	Posición Horaria GWUT [Hs.]	Cat. GWUT	Foco	Prioridad de Seg. GWUT
A	4.51	1,53	Si	2.91	18.75	10.30	1	DIR 3	Alta – 3
B	4.62	0,14	No	-	-	-	-	-	-
C	4.73	7,30	Si	6.77	36.41	1.00-8.00	2	DIR 1	Media – 2
D	4.83	0,15	No	-	-	-	-	-	-
E	4.03	3,23	Si	4.66	20.95	07.30	1	DIR 3	Alta – 3
F	2.40	0,07	No	-	-	-	-	-	-
G	3.50	3,89	Si	3.63	22.81	12.00	3	DIR 3	Alta – 9
H	3.20	6,17	Si	6.30	23.88	01.30	1	DIR 3	Alta – 3
I	2.30	0,07	No	-	-	-	-	-	-