

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA EVALUAR LA ADHERENCIA EN REVESTIMIENTOS

Andrea Moneta
moneta@giegroup.net
GIE Group

Martín Chimenti
M.Chimenti@aroline.com.ar
ARO S.A

1. Sinopsis

Desde hace ya varios años se viene trabajando en la industria de Oil & Gas sobre la problemática de la adherencia del revestimiento de polietileno tricapa, debido a sus serias consecuencias en relación del apantallamiento de la protección catódica que produce que ha llevado incluso a fallas en servicio. Hasta tal punto se tiene conciencia de esta situación, que el Código Federal de EEUU (Crf 192)⁽¹⁾, ha establecido que para trabajar a la MAPO alternativa de hasta 80% de la TFME, los gasoductos deben tener un revestimiento que no apantalle la protección catódica.

Hemos visto casos de evaluaciones de grandes estibas de cañerías revestidas con PET (Polietileno Extruido Tricapa) donde, entre varias pruebas que se le ejecutaron para verificar su estado (elongación, estudios reológicos, índice de oxidación, dureza, espectroscopía infrarroja), el ensayo de adherencia contaba, sin duda, con el mayor protagonismo. Este test es el conocido como “pull off”, de característica destructiva y se encuentra detallado en varias normativas (ASTM D4541, DIN 30670). Esto demandó por ejemplo⁽²⁾ que en una muestra de 200 tubos se tuviera que realizar el ensayo destructivo, debiéndose luego reparar el daño provocado. En general, los planes de rutina de control de estiba no suelen contemplar este ensayo precisamente para evitar dañarlo, y una buena práctica es ensayarlo previo a su utilización en campo.

Una metodología usual para detectar revestimiento tricapa con potencial riesgo de apantallamiento de un proceso corrosivo, es analizar mantas con indicio de corrosión en el metal (informado en una inspección interna ILI), asumiendo que se producirá un ingreso de electrolito desde ese punto hacia el cuerpo de la cañería.

Actualmente también algunas herramientas de inspección interna están siendo perfeccionadas en la detección de revestimiento dañado y hasta despegado. Sería de gran ayuda para ingeniero de corrosión contar con un instrumento no destructivo para detectar revestimiento despegado.

Este trabajo mostrará un medio de hacerlo en forma local con una tecnología que se viene utilizando con otros fines en las actividades de inspecciones de integridad, pero que podría implementarse en forma sistematizada para poder realizar un diagnóstico sobre un sistema completo. Mostraremos en una primera instancia las pruebas que se hicieron en laboratorio sobre una probeta con polietileno despegado, analizando las respuestas del instrumento y comparándolas con las señales obtenidas en otra probeta con el revestimiento perfectamente adherido. También compartiremos ensayos realizados en campo, ejecutados con distintos equipamientos para validar el uso del método.

2. Introducción

En los últimos años se han detectado muchos casos de falla en adherencia del revestimiento tricapa tanto en cañerías en almacenamiento como en servicio (Figura 1). En su mayoría se trata de fallas por falta de adherencia al sustrato, que implica que el sistema completo aplicado puede ser fácilmente removido. Las causas para este tipo de falla suelen estar ligadas a:

- No existencia de perfil de anclaje
- Presencia de contaminantes superficiales
- Curado deficiente de la primera capa (epoxi)



Fig.1 – Falta de adherencia en cañerías en estiba y en operación

Frente a estos antecedentes se ha vuelto sumamente necesario realizar ensayos de adherencia principalmente antes de la instalación de las cañerías. A continuación (Figura 2), se muestra el caso de una estiba de gran magnitud donde por muestreo estadístico se realizó a 200 caños el test conocido como “pull off”, de característica destructiva, debiéndose posteriormente proceder con las reparaciones.



Fig.2 – Estudio destructivo de adherencia en cañerías estibadas.

Si bien este método permite obtener información directa sobre las propiedades del recubrimiento, presenta limitaciones en cuanto a los costos operativos y la preservación de la integridad de las cañerías inspeccionadas.

Una alternativa que podría simplificar el monitoreo de estibas sin dañar el revestimiento es realizarlo con Ultrasonido, uno de los métodos más utilizados en Ensayos No Destructivos para la evaluación de materiales y componentes⁽³⁾. Su principio de funcionamiento se basa en la propagación de ondas acústicas de alta frecuencia y en el análisis de las reflexiones generadas en interfaces entre materiales con distintas propiedades acústicas.

En el caso de cañerías de acero revestidas con recubrimiento tricapa, el Ultrasonido permite analizar la respuesta del recubrimiento y del sustrato metálico, posibilitando la detección de discontinuidades y eventuales pérdidas de adherencia. En determinados casos, dependiendo del estado del revestimiento, la técnica también permite evaluar el material base en busca de corrosión sin necesidad de remover el recubrimiento. Para ello, se analizan las variaciones de la señal ultrasónica, tanto en posición como en amplitud. Estas variaciones permiten identificar cambios en las condiciones del revestimiento, en la interfaz acero–recubrimiento y en el material base.

La aplicación del Ultrasonido como método de evaluación no destructiva constituye una alternativa a los ensayos convencionales, posibilitando ampliar la cobertura de inspección, reducir la necesidad de extracción de muestras y generar información relevante para el diagnóstico de aptitud para el servicio de cañerías en operación o en estiba.

2.2 Fundamentos físicos

La propagación de ondas ultrasónicas en sistemas revestidos, como los esquemas tricapa aplicados a cañerías de acero, está gobernada por las propiedades acústicas de los materiales involucrados. En particular, la impedancia acústica del revestimiento determina el comportamiento de las ondas incidentes en las interfaces entre materiales.

La impedancia acústica Z se define como el producto entre la densidad del material y la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en dicho medio. Cuando una onda ultrasónica incide sobre una interfaz entre dos materiales con diferentes impedancias acústicas, parte de la energía se refleja y parte se transmite. La magnitud de la reflexión depende del contraste de impedancias entre ambos medios.

En un esquema de revestimiento tricapa, compuesto por acero base, capa adhesiva y capas poliméricas, se generan múltiples reflexiones en las distintas interfaces. La presencia de discontinuidades, falta de adherencia o separaciones entre capas modifica el patrón de reflexiones, lo que permite inferir cambios en el estado del revestimiento a partir del análisis de la señal ultrasónica.

Desde el punto de vista del tipo de ondas utilizadas, en la inspección ultrasónica de revestimientos predominan las ondas longitudinales, debido a su mayor capacidad de penetración y a la simplicidad en la interpretación de las señales reflejadas.

La aplicación del Ultrasonido en este tipo de sistemas permite, por lo tanto, evaluar en forma indirecta el estado del revestimiento sin necesidad de recurrir a la extracción de muestras, constituyendo una herramienta alternativa a los ensayos destructivos tradicionales.

Si una onda ultrasónica incide normalmente sobre la interfase entre dos materiales, una parte de su energía es transmitida al segundo medio, mientras que otra parte es reflejada, tal como se esquematiza en la Figura 3.

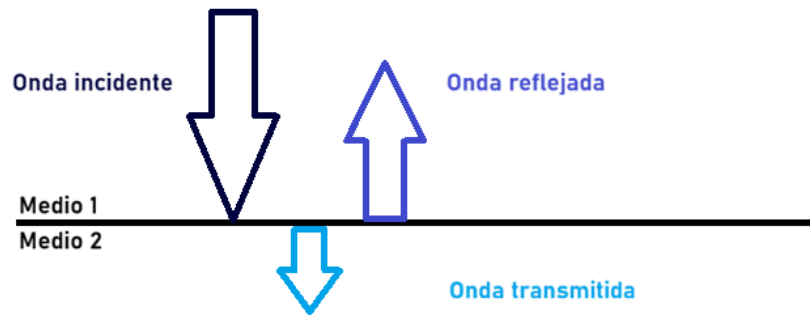


Fig. 3: Incidencia del Ultrasonido en dirección normal a la interfase de dos medios

Las proporciones de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia acústica de ambos materiales, que puede expresarse como:

$$Z = p \cdot c$$

Donde:

- Z = Impedancia acústica
- P = densidad del material del medio considerado
- c = velocidad de propagación acústica del material del medio considerado

Si una onda ultrasónica se propaga en un material con impedancia acústica Z_1 e incide perpendicularmente sobre una interfase con otro material de impedancia Z_2 , se definen las siguientes magnitudes:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$T = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Donde R es el factor de reflexión y T el factor de transmisión.

El factor de reflexión representa la proporción de presión acústica reflejada, mientras que el factor de transmisión representa la proporción de presión acústica transmitida al segundo material. El valor de R y T puede ser positivo o negativo, dependiendo de la relación entre Z_1 y Z_2 .

En el caso analizado, considerando valores teóricos de impedancia acústica (Figura 2), se obtienen las siguientes relaciones:

$$R = \frac{0,23 - 4,541}{0,23 + 4,541} = -0,903 = -90,3 \%$$

$$T = \frac{2 \cdot 4,541}{4,541 + 0,23} = 1,903 = 190,3 \%$$

Estos resultados permiten comprender por qué es posible realizar el ensayo de adherencia entre el revestimiento tricapa y la cañería de acero, ya que la transmisión de la onda ultrasónica en la interfase revestimiento–acero es significativa. En sentido inverso, si se intentara evaluar la

adherencia desde el interior de la cañería, la interfase acero–revestimiento presentaría una elevada reflexión y una transmisión prácticamente nula.

Material	Velocidad Longitudinal		Velocidad de Corte		Impedancia Acústica
	in/ μ seg	cm/ μ seg	in/ μ seg	cm/ μ seg	
Aceite de motor	0.069	0.174	---	---	0.151
Acero 1020	0.232	0.589	0.128	0.324	4.541
Acero 4340	0.230	0.585	0.128	0.324	4.563
Acero 316	0.23	0.58	0.12	0.31	4.6
Agua	0.058	0.148	---	---	0.148
Aluminio	0.249	0.632	0.123	0.313	1.706
Babbitt	0.091	0.23	---	---	2.32
Berilio	0.508	1.290	0.350	0.888	2.35
Bronce	0.14	0.35	0.088	0.22	3.13
Cobre	0.183	0.466	0.089	0.226	4.161
Estañio	0.131	0.332	0.066	0.167	2.420
Gasolina	0.049	0.13	---	---	0.10
Glicerina	0.076	0.192	---	---	0.242
Hierro	0.232	0.590	0.127	0.323	4.543
Hierro (Gris)	0.19	0.48	0.095	0.24	3.74
Hierro (Nodular)	0.22	0.56	---	---	---
Inconel	0.229	0.582	0.119	0.302	4.947
Latón	0.174	0.443	0.083	0.212	3.730
Lucita	0.106	0.268	0.050	0.126	0.316
Magnesio	0.23	0.58	0.12	0.30	1.06
Mercurio	0.057	0.145	---	---	1.966
Molibdeno	0.246	0.625	0.132	0.335	6.375
Monel	0.21	0.54	0.11	0.27	4.76
Niquel	0.222	0.563	0.117	0.296	4.999
Oro	0.128	0.324	0.047	0.120	6.260
Perspex	0.107	0.273	0.056	0.143	0.322
Plata	0.142	0.360	0.063	0.159	3.776
Platino	0.156	0.396	0.066	0.167	5.474
Plexiglass	0.11	0.28	0.043	0.11	0.35
Plomo	0.085	0.216	0.028	0.07	2.449
Poliamida (Nylon)	0.102	0.260	0.047	0.120	0.310
Poliestireno	0.092	0.234	---	---	0.247
Polietileno	0.11	0.27	---	---	0.23
PVC	0.094	0.2395	0.042	0.106	0.335

Fig. 4: Tabla de propiedades acústicas para distintos materiales

3. Desarrollo

3.1 Ensayos en laboratorio

Con el objetivo de validar en forma práctica lo expresado hasta aquí a nivel teórico, en una primera instancia se realizaron pruebas sobre probetas y sobre una cañería perteneciente a una línea operativa.

La probeta analizada presenta tres zonas de interés claramente diferenciadas: una zona donde el revestimiento fue retirado, otra donde el revestimiento se encuentra levantado (sin haber sido removido, simulando un despegue) y una tercera zona donde el revestimiento está correctamente adherido.

En primer lugar, se analizó la respuesta del ultrasonido en el acero sin revestimiento, tal como se muestra en la Fig. 5.

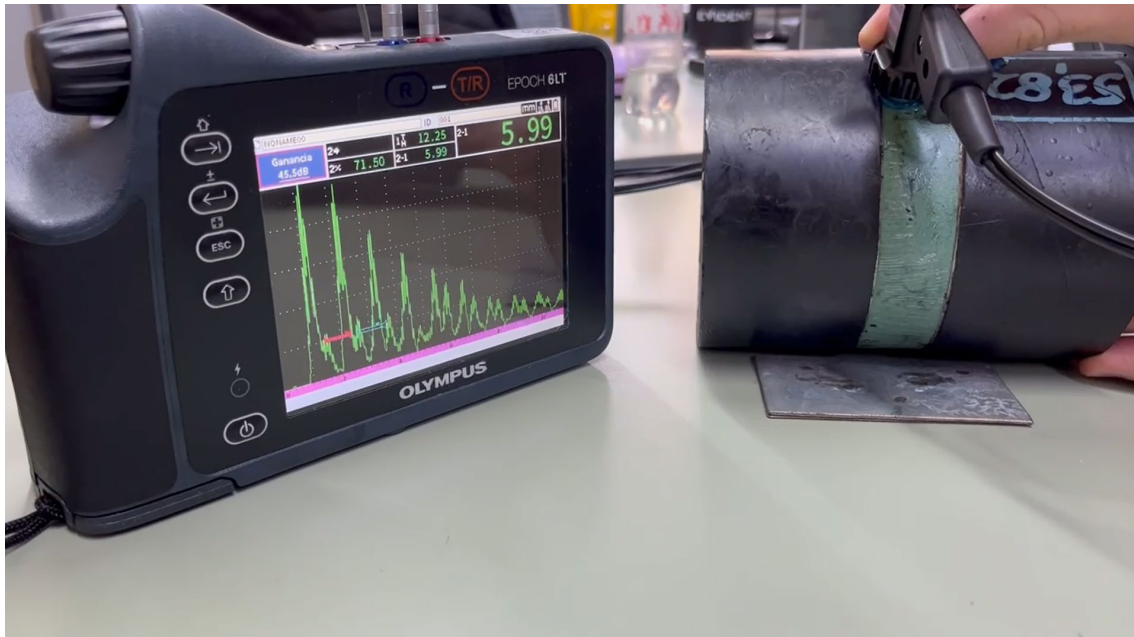


Fig. 5: Visualización de ecos en A-Scan generados por el material base sin revestimiento.
Espesor de acero: 5,99 mm.

En esta condición se observa el eco de fondo, junto con aproximadamente ocho ecos repetitivos distribuidos a lo largo del eje de distancia del A-Scan. Asimismo, la respuesta en amplitud es la esperable para este tipo de inspección, con un decaimiento progresivo producto de la atenuación de la onda ultrasónica en función del tiempo/distancia.

Cuando el transductor se apoya sobre una zona con revestimiento, como se muestra en la Fig. 6, se verifica que el mismo se encuentra correctamente adherido, ya que se visualiza el eco correspondiente al revestimiento y, a continuación, el eco de fondo del acero junto con sus repeticiones. En cuanto a la amplitud, se aprecia una leve atenuación atribuible a la presencia del revestimiento.

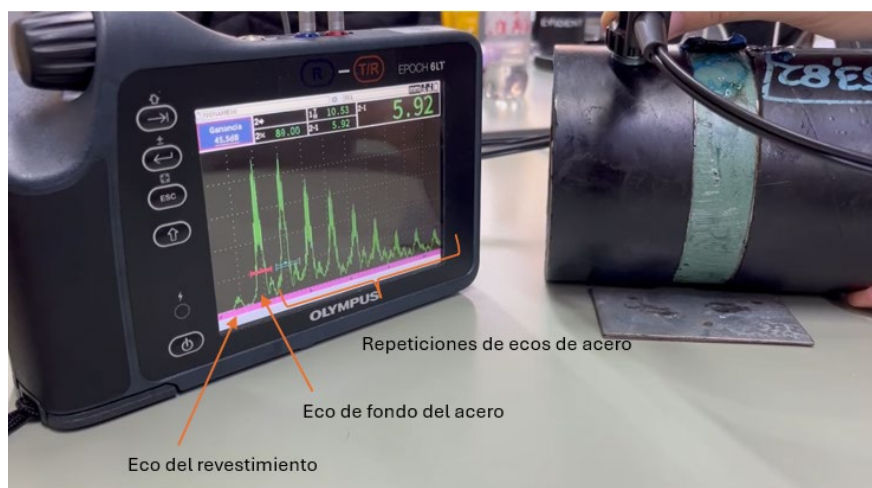


Fig.6: Visualización de ecos en A-Scan generados por el revestimiento y el material base.
Espesor de acero: 5,92 mm.

Asimismo, se observa un desplazamiento en el eje de distancia provocado por la presencia del revestimiento. De este modo, se concluye que, cuando la adhesión es adecuada, se produce

una ligera disminución de la amplitud y un corrimiento en la posición de los ecos correspondientes al acero. Además, se identifica el eco del revestimiento previo a los ecos del material base.

En la Fig.7 se presenta la respuesta del ultrasonido ante una incipiente falta de adherencia. En este caso, la amplitud de los ecos del acero comienza a disminuir, debido a que la transmisión del ultrasonido se ve progresivamente afectada por el despegue del revestimiento.

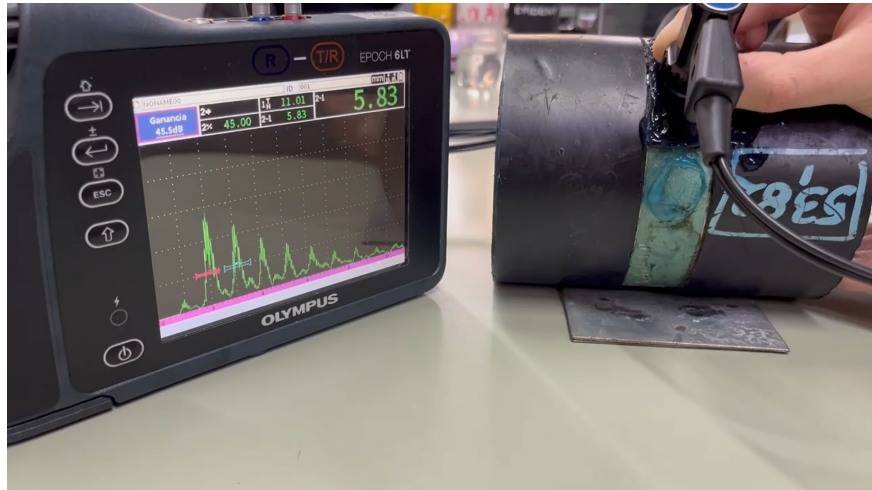


Fig.7: Respuesta ultrasónica ante la aparición incipiente de despegue. Espesor de acero: 5,83 mm.

Cuando el despegue es total, como se observa en la Fig. 8, el A-Scan presenta uno o dos ecos correspondientes al revestimiento (eco de fondo del tricapa y, eventualmente, una repetición). No se observan más repeticiones, ya que el revestimiento es un material altamente atenuante desde el punto de vista ultrasónico. La presencia de una delgada capa de aire entre el revestimiento y el acero impide la propagación del sonido hacia el material base.

En este caso, el espesor indicado por el equipo de ultrasonido es de 6,66 mm. Este valor, si bien corresponde al espesor del revestimiento tricapa, presenta un error, ya que el equipo lo calcula utilizando la velocidad de propagación del sonido del acero al carbono. Para obtener el valor real del espesor del revestimiento, se puede calibrar el equipo con la velocidad de propagación correspondiente a dicho material, o bien aplicar una relación de velocidades:

$$\text{Espesor real} = \text{Espesor medido} \cdot \frac{\text{velocidad de propagación del material calibrado}}{\text{velocidad de propagación teórica de material distinto al calibrado}}$$

$$\text{Espesor real} = 6,66 \text{ mm} \cdot \frac{2700 \text{ m/s}}{5890 \text{ m/s}} = 3,05 \text{ mm}$$

De este modo, se obtiene un dato adicional que puede aportar este ensayo: el espesor de la capa de revestimiento.



Fig.8: A-Scan correspondiente a un despegue total del revestimiento.

3.2 Ensayos en campo

Se realizó una prueba sobre un ducto existente, expuesto mediante excavación controlada (Fig. 9), en la cual se evaluaron más de veinticinco puntos distintos, y de diferentes posiciones, para analizar la adherencia del revestimiento, complementando las mediciones con múltiples barridos. Durante el ensayo no se detectaron zonas con falta de adherencia (Fig. 11 y 12).

Adicionalmente al control de adherencia, y considerando que el equipo de ultrasonido permite determinar el espesor en el punto de apoyo del transductor, se registró un espesor remanente promedio del acero de 8,64 mm. En la zona correspondiente a la costura longitudinal de la cañería se detectaron espesores promedio de 10,50 mm.



Fig. 9: Ducto expuesto mediante excavación controlada



Fig. 10: Ensayo de adherencia y determinación de espesor en el material base mediante ultrasonido.

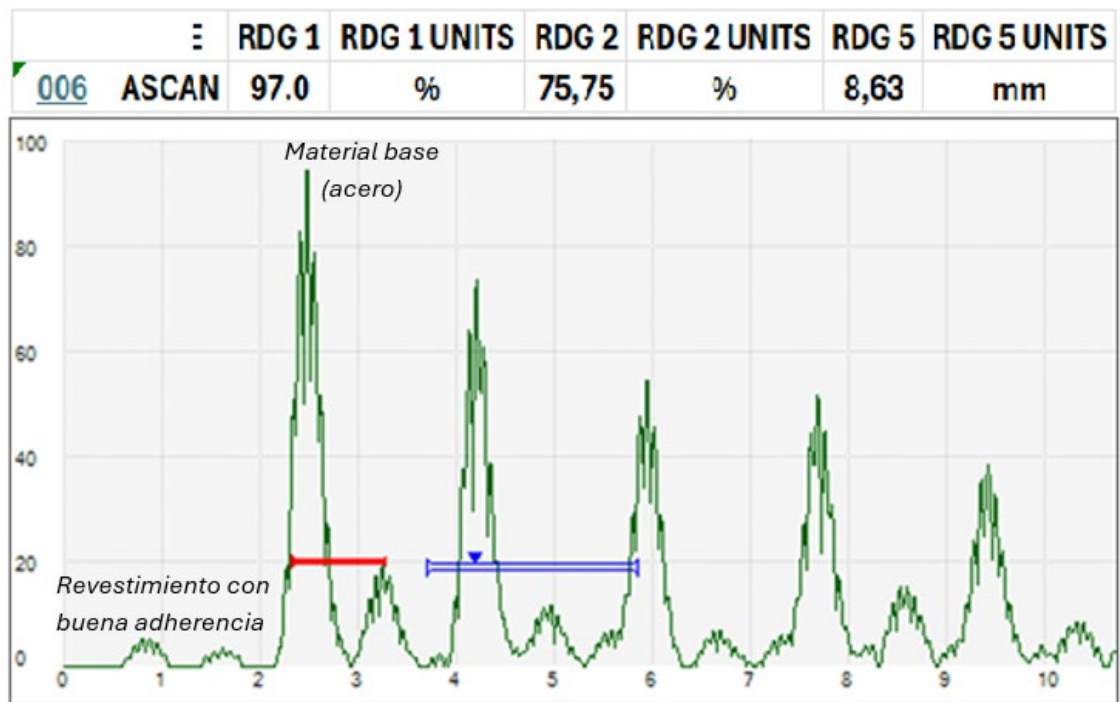


Fig. 11 Registro de A-Scan correspondiente a una zona de adherencia total entre revestimiento y acero.

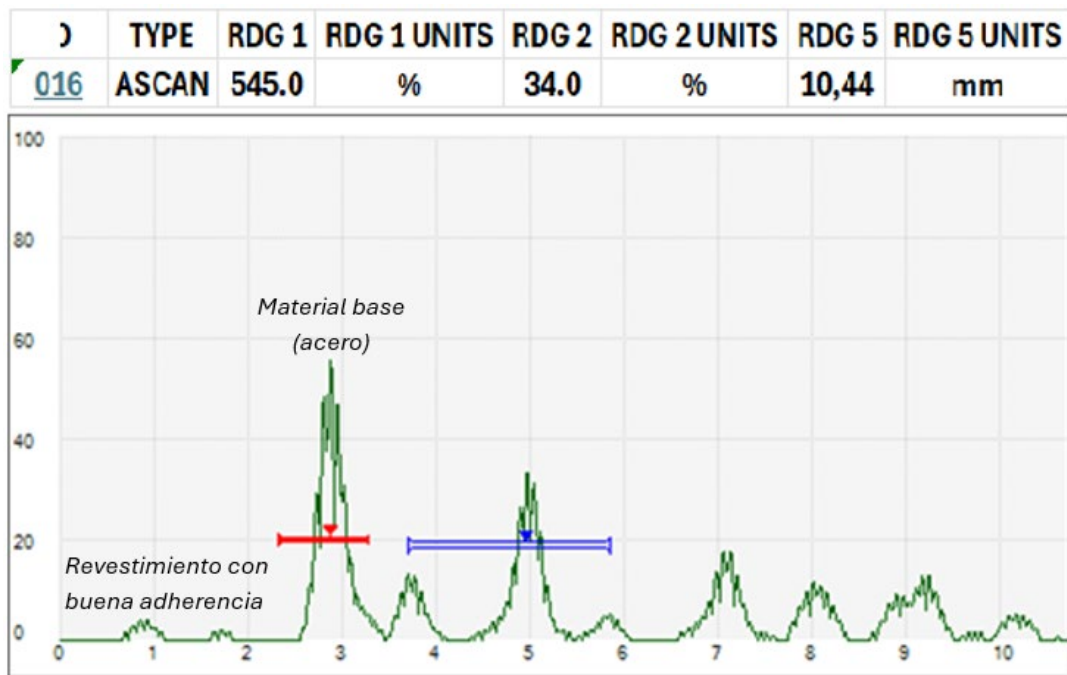


Fig. 12: Registro de A-Scan correspondiente a una zona de adherencia total sobre la costura longitudinal.

Asimismo, se realizó un barrido mediante la técnica de Phased Array, en forma manual (Fig. 13), la cual proviene del método Ultrasonido. A diferencia del Ultrasonido Convencional, que presenta la información en forma de ecos puntuales, la técnica de Phased Array permite obtener imágenes correspondientes a los distintos planos que componen la pieza inspeccionada.

En este caso, y en función del transductor utilizado, se obtuvo una cobertura efectiva de 27 mm de ancho de haz, aproximadamente tres veces superior a la lograda con ultrasonido convencional. Dependiendo del transductor empleado, es posible alcanzar coberturas de hasta 60 mm.



Fig. 13: Ensayo de adherencia mediante Phased Array. Imagen correspondiente al plano transversal de la cañería.

En la Fig. 14 se presenta un S-Scan en el que se representan los 27 mm de cobertura del haz del transductor de Phased Array. En dicha vista se observa la señal correspondiente al revestimiento, sin interrupciones, lo que indica una adecuada adherencia entre el revestimiento y la cañería. A continuación, se identifican las indicaciones correspondientes al acero y sus repeticiones.

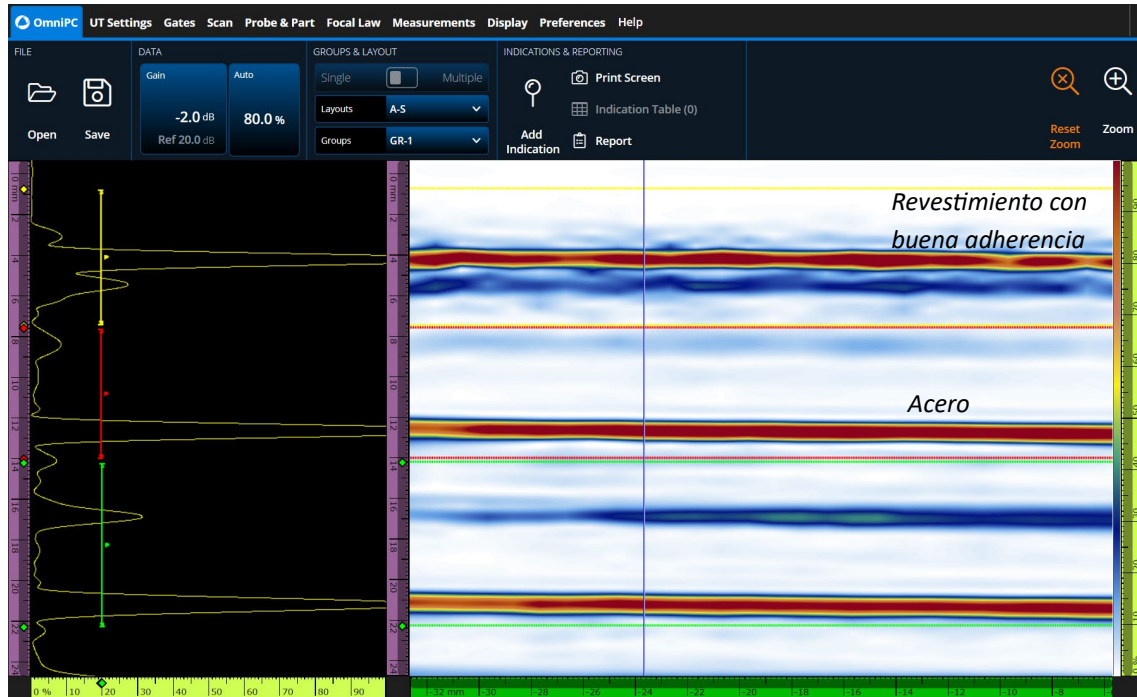


Fig. 14: Indicaciones obtenidas mediante Phased Array.

En la Fig. 15 se observa una interrupción en la señal del revestimiento, así como en la del acero y sus repeticiones. Esta respuesta se asocia a una pequeña discontinuidad superficial del revestimiento, que genera una perturbación en la propagación del ultrasonido.

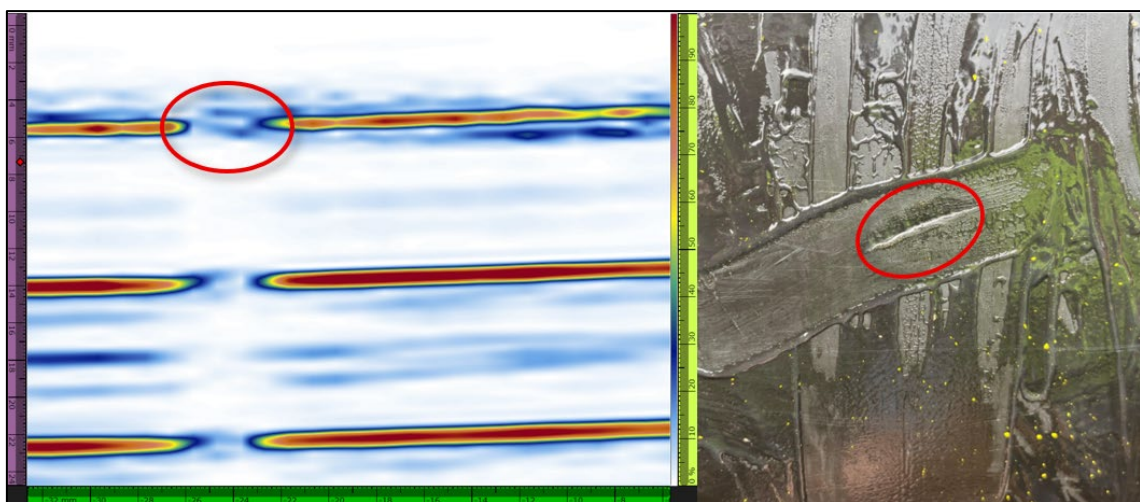


Fig. 15: Discontinuidad localizada en el revestimiento.

Por otra parte, como se muestra en las Fig. 16 y 17, se ensayó una probeta con revestimiento que presenta un agujero de fondo plano mecanizado, simulando una pérdida de

material. La adherencia del revestimiento resultó adecuada, mientras que en la señal correspondiente al acero se observó una interrupción asociada a la discontinuidad.

Considerando la reflexión generada por el agujero de fondo plano, se identificó una indicación de tipo planar en el S-Scan, la cual fue dimensionada mediante herramientas de compuertas y cursores. Se determinó una profundidad de 4,42 mm, equivalente a una pérdida de material del 25,1 % respecto del espesor nominal, y un ancho (diámetro en este caso) de 4,50 mm.

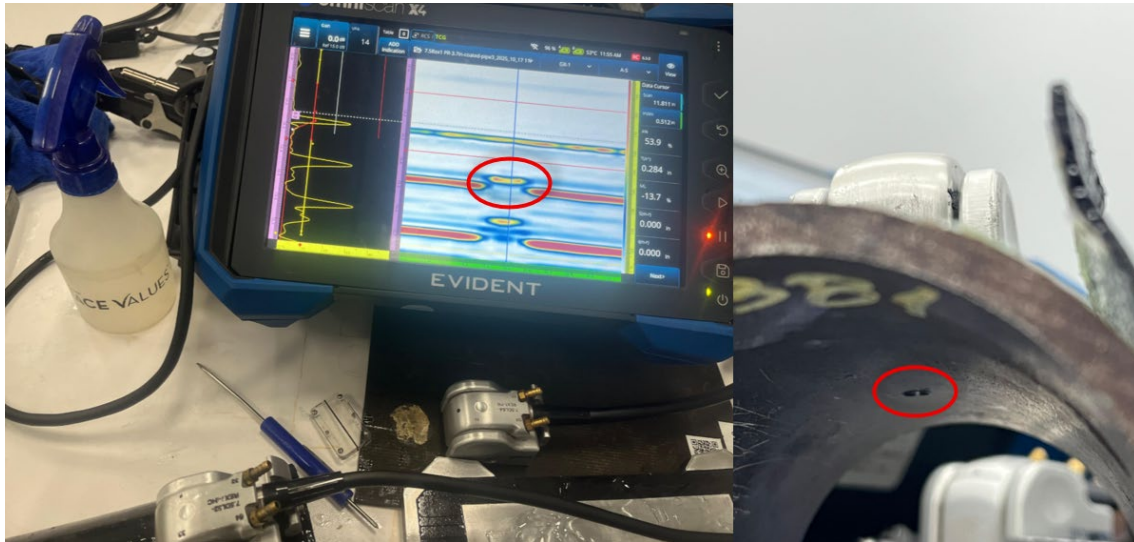


Fig. 16: Ensayo simultáneo de adherencia del revestimiento y evaluación de corrosión.

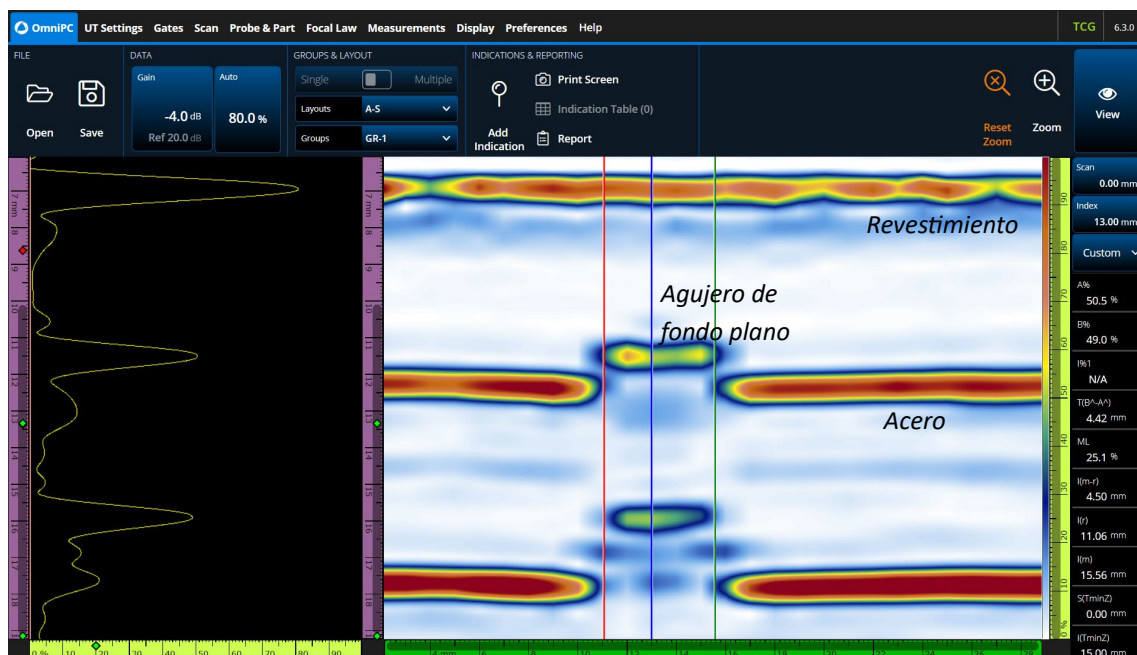


Fig. 17: Visualización de revestimiento adherido e indicación correspondiente a un agujero de fondo plano de 4,50 mm de diámetro, ubicado a una profundidad de 4,42 mm (25,1 % de pérdida de espesor).

Para la correcta ejecución de estos ensayos, en particular mediante Phased Array, resulta fundamental que la superficie del revestimiento se encuentre en buen estado, de modo de garantizar un adecuado apoyo del transductor y un contacto óptimo con el recubrimiento.

Adicionalmente, la técnica de Phased Array permite incrementar significativamente la productividad de inspección en comparación con el Ultrasonido convencional. Cuando el transductor se monta en un escáner semiautomático o automático, es posible realizar mapeos en dos direcciones, obteniendo información de adherencia con resolución milimétrica y velocidades de barrido del orden de 330 mm/s.

Un ejemplo de esta aplicación se presenta en la Fig. 18, donde se realizó una inspección de corrosión sin remover el revestimiento, utilizando un transductor de columna de agua y un escáner semiautomático sobre un área puntual de 300 x 400 mm.



Fig. 18: Inspección con escáner semiautomático

Durante esta inspección, cuyo objetivo era corroborar indicaciones previamente reportadas por la herramienta ILI, se detectaron pequeñas indicaciones asociadas al revestimiento, tal como se observa en la Fig. 19. A diferencia de los casos presentados anteriormente en este trabajo, en esta instancia el objetivo principal fue la evaluación de corrosión en el material base y no la adherencia del revestimiento. Por tal motivo, la configuración del equipo difirió levemente respecto de las aplicaciones previamente expuestas, lo que dio lugar a una visualización en pantalla ligeramente distinta.

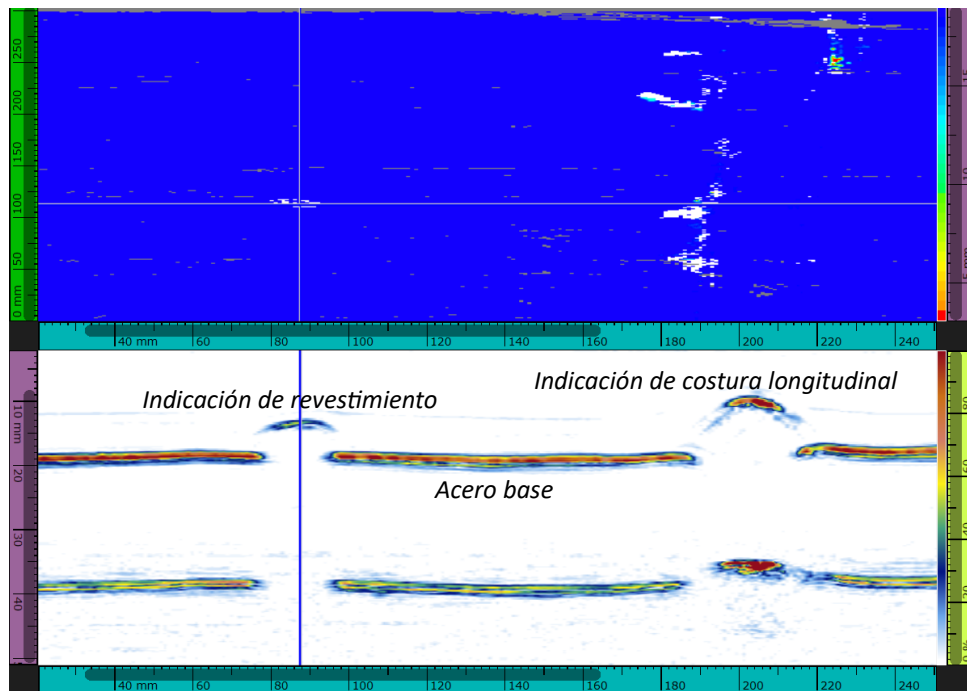


Fig. 19: Indicación de revestimiento, de 8 x 14 mm, a partir de visualización de vistas C-Scan y B-Scan.

En este caso, frente a la falta de adherencia, se procedió a retirar el revestimiento en el área indicada, con el fin de evaluar directamente el material base. Una vez repetida la inspección sin la presencia del revestimiento, el mapeo resultó libre de indicaciones, confirmando que el material base del ducto se encontraba dentro de su espesor nominal y que la señal previamente observada correspondía exclusivamente al revestimiento.

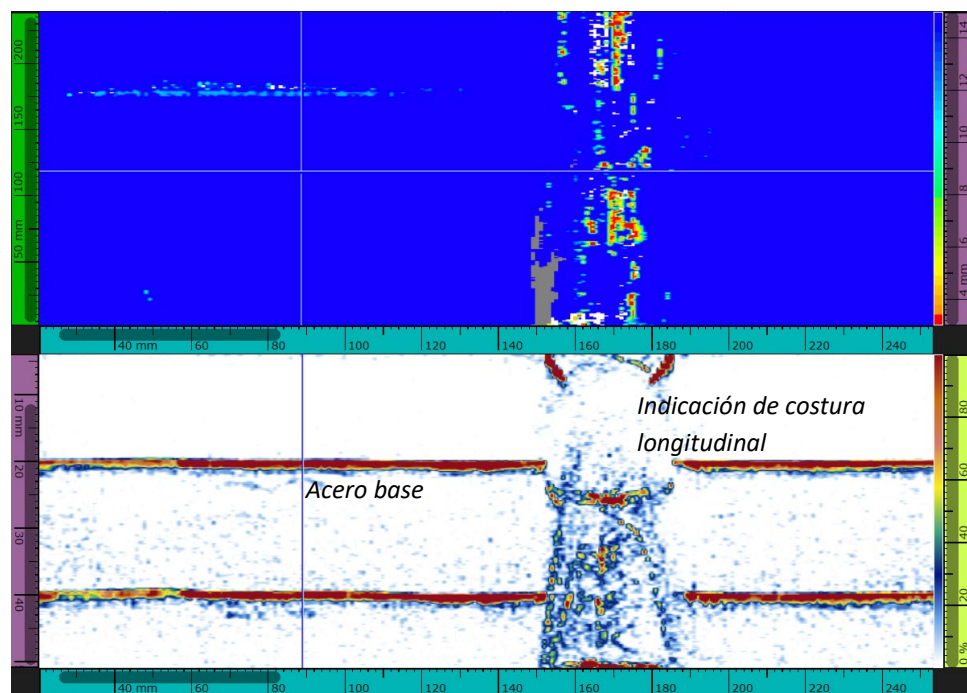


Fig. 20: Mapeo sin revestimiento, que confirma que la indicación encontrada en la Fig. 19 correspondía al revestimiento y no al acero base.

3. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el Ultrasonido permite identificar, de manera confiable, el estado de adherencia del revestimiento tricapa en cañerías de acero, sin necesidad de recurrir a ensayos destructivos. El análisis de la señal ultrasónica, en particular la presencia, amplitud y posición de los ecos, permite diferenciar claramente entre zonas con adherencia adecuada y zonas con distintos grados de despegue del revestimiento.

Asimismo, se verificó que la técnica de Phased Array amplía las capacidades del método Ultrasonido, al posibilitar una mayor cobertura de inspección, un incremento en la productividad y la obtención de información continua mediante barridos y mapeos. Esta característica resulta especialmente relevante para la evaluación de grandes extensiones de cañerías, donde los ensayos puntuales pueden resultar insuficientes desde el punto de vista estadístico.

En comparación con los ensayos destructivos tradicionalmente utilizados para la evaluación de la adherencia del revestimiento tricapa, el enfoque propuesto permite reducir significativamente la intervención sobre las cañerías, evitando daños en el recubrimiento y la necesidad de reparaciones posteriores. Esto abre la posibilidad de incorporar la técnica dentro de programas de control de estiba y de inspección en servicio, complementando las metodologías actualmente empleadas.

Desde el punto de vista de la integridad de ductos, la detección temprana de zonas con pérdida de adherencia del revestimiento constituye un aspecto crítico, dado su vínculo con fenómenos de apantallamiento de la protección catódica y con el desarrollo de procesos corrosivos localizados. En este sentido, la aplicación del Ultrasonido como método no destructivo representa una herramienta potencialmente valiosa para el diagnóstico del estado del revestimiento y la toma de decisiones en ingeniería de corrosión.

Finalmente, los ensayos realizados en laboratorio y en campo permiten concluir que la metodología propuesta resulta técnicamente viable y susceptible de ser implementada de manera sistematizada. Su aplicación en combinación con otras técnicas de inspección podría contribuir a una evaluación más integral del estado de los sistemas de cañerías, tanto en condiciones de estiba como en servicio.

4. Bibliografía

- (1) Código de Regulaciones Federales de EEUU 49 CFR 192 - TRANSPORTE DE GAS NATURAL Y OTROS GASES POR GASODUCTO: ESTÁNDARES MÍNIMOS DE SEGURIDAD FEDERAL.
- (2) EVALUACIÓN DE REVESTIMIENTO EN CAÑERÍAS ESTIBADAS, Moneta/Pellasio, 5to Congreso de Integridad y Corrosión en la Industria del Petróleo y del Gas, 2024.
- (3) NACE International Publication 3T199 -Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications

5. Cv de los autores

Andrea Moneta

- Ing. Química egresada de UTN

- Más de 25 años de experiencia en la industria del petróleo y el gas en proyectos de integridad y particularmente corrosión. Certificaciones AMPP CP3 Tecnólogo de Protección Catódica, CIP2 Inspector de Revestimientos Nivel 2, e CI2 Ingeniera Senior en Corrosión Interna.
- Cargo actual: Especialista y líder del equipo de Protección Anticorrosiva de GIE Group.

Martín Cimenti

- Ing. Mecánico egresado de UTN
- Más de 14 años de experiencia en especialización en Ensayos No Destructivos Avanzados (NDT), brindando soluciones a problemáticas específicas en industrias como Oil&Gas, con reconocimientos a nivel regional en Latinoamérica.
- Cargo actual: Líder de la Unidad de Negocios de NDT en ARO S.A.