

APLICACIÓN DE ESCANEEO 3D PARA EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD EN DUCTOS

Christopher Soriano, AMPP Perú Chapter, sorianotorres150600@gmail.com

Esteban Cáceres, Aconcagua Ingeniería, esteban.caceres@aconcaguaingenieria.com

Bernardo Elósegui, Aconcagua Ingeniería, bernardo.elosegui@aconcaguaingenieria.com

1. Sinopsis

En este trabajo se presentan experiencias prácticas de aplicación del escaneo láser 3D en campo como herramienta complementaria para la caracterización geométrica avanzada de anomalías detectadas mediante inspección interna (ILI) en ductos de transporte.

Se presentan tres casos de estudio representativos. El primero corresponde a una abolladura inicialmente reportada por ILI como compleja por proximidad a soldadura y presencia de indicios de daño volumétrico. El segundo caso aborda una abolladura bajo recubrimiento de hormigón, sin acceso directo a la deformación. El tercer caso expone la digitalización 3D de una grapa de refuerzo recuperada tras un evento de fuga, mostrando la utilidad del escaneo para documentar geometría “as-found”, evaluar condiciones reales de ajuste/contacto y alimentar simulaciones numéricas orientadas a análisis de causa raíz.

La incorporación del escaneo 3D permite generar modelos tridimensionales de alta fidelidad de la geometría externa del ducto y de componentes asociados, superando las limitaciones propias de las mediciones directas por contacto en condiciones reales de campo. A partir de estos modelos se obtiene una caracterización detallada de parámetros clave, tales como profundidad efectiva, radios mínimos de curvatura, extensión longitudinal y circunferencial del daño, distribución angular de deformaciones y ovalidad.

El análisis técnico incluyó:

- Evaluación tensional basada en deformación conforme a ASME B31.8 (Apéndice R).
- Evaluación de susceptibilidad a fatiga y estimación de vida remanente según API RP 1183 y modelos EPRG.
- Aplicación de criterios de aptitud para el servicio (FFS) conforme a API 579-1 / ASME FFS-1 en escenarios seleccionados.

Los resultados demuestran que el escaneo 3D es viable en condiciones reales de campo, con tiempos de ejecución inferiores a los requeridos por los métodos tradicionales de inspección directa, aportando mejoras en precisión, cobertura, trazabilidad y soporte para la toma de decisiones. La metodología propuesta fortalece la confiabilidad de los datos de entrada en evaluaciones normativas (ASME B31.8 Apéndice R, API RP 1183 y API 579) y constituye un enfoque replicable para inspecciones directas que enfrentan indicaciones complejas de relevancia. Asimismo, permite respaldar decisiones de integridad tanto para la aceptación segura de anomalías como para la definición de acciones de remediación cuando corresponde.

2. Introducción

La integridad estructural de ductos sometidos a condiciones operativas exigentes depende, en gran medida, de la detección oportuna y de la caracterización precisa de anomalías que puedan comprometer su desempeño. En la práctica, la inspección interna (ILI) constituye la herramienta principal para identificar y localizar abolladuras, ovalidades, pérdidas de espesor y otras condiciones relevantes a lo largo de la tubería. Sin embargo, cuando se trata de daños complejos o ubicados en zonas críticas (por ejemplo, cercanos a soldaduras circunferenciales o combinados con distintos tipos de indicaciones) la información disponible puede no resultar suficiente para una evaluación estructural confiable.

En estos escenarios, los programas de integridad requieren la ejecución de inspecciones directas en campo para caracterizar la geometría real del daño. Tradicionalmente, esta etapa se basa en mediciones manuales por contacto, tales como reglas comparadoras y galgas, entre otros métodos. Estas técnicas introducen incertidumbres significativas debido a restricciones de acceso, curvaturas del ducto, desalineaciones constructivas y a la dependencia del criterio y la capacidad técnica del operador.

La incorporación de tecnologías de escaneo 3D permite reemplazar estas metodologías tradicionales de medición directa de indicaciones externas por una captura tridimensional sin contacto, generando modelos digitales detallados de la geometría real del ducto. A partir de estos modelos es posible extraer parámetros geométricos clave, tales como profundidades efectivas, radios de curvatura, distribución angular de la deformación y ovalidades. Estos datos mejoran la calidad y confiabilidad de la información utilizada en evaluaciones normativas conforme a ASME B31.8, API RP 1183 y API 579-1 / ASME FFS-1.

El presente trabajo describe la metodología empleada para la captura y el procesamiento de escaneos 3D en campo, y presenta una serie de casos de estudio en los que se integra la información geométrica obtenida con criterios normativos de aptitud para el servicio y evaluación de vida remanente.

3. Desarrollo

El desarrollo del presente trabajo se orienta a la mejora de la actividad de inspección en campo mediante la incorporación del escaneo tridimensional (3D) como herramienta principal para la caracterización de anomalías geométricas y volumétricas en ductos de transporte, así como para el relevamiento geométrico de componentes asociados a análisis de falla.

3.1. Descripción del Problema

La evaluación de la integridad de ductos de transporte de gas y petróleo se basa en la identificación oportuna y en la adecuada caracterización de anomalías que puedan comprometer su desempeño estructural y la continuidad operativa de la línea. En este marco, las inspecciones internas (ILI) constituyen la herramienta principal para la detección y localización de anomalías geométricas, tales como abolladuras, ovalidades y deformaciones localizadas, así como para la identificación de anomalías volumétricas asociadas a pérdida de espesor.

No obstante, cuando las anomalías detectadas presentan geometrías complejas, se ubican en zonas críticas del ducto o se encuentran condicionadas por factores particulares de campo, la información proporcionada por la inspección interna puede resultar insuficiente para una evaluación estructural confiable.

En estos escenarios, las prácticas de gestión de integridad requieren la ejecución de inspecciones directas en campo, orientadas a caracterizar con mayor precisión la geometría real del daño y a generar información confiable que permita alimentar los análisis de integridad conforme a los criterios normativos aplicables, tales como ASME B31.8, API RP 1183 y API 579-1 / ASME FFS-1. La correcta cuantificación de anomalías geométricas y volumétricas resulta necesaria para la evaluación de la aptitud para el servicio del ducto, ya que influye directamente en la determinación de niveles de severidad, márgenes de seguridad y en la definición de la necesidad de acciones correctivas.

Tradicionalmente, la caracterización en campo de anomalías geométricas se realiza mediante métodos manuales, tales como el uso de reglas comparadoras y herramientas de relevamiento de perfil. Estos métodos presentan limitaciones en términos de precisión, cobertura del área evaluada y eficiencia operativa, especialmente bajo condiciones de campo adversas. De manera similar, los métodos convencionales empleados para la evaluación de anomalías volumétricas no siempre permiten relevar con suficiente detalle la magnitud y la distribución de la pérdida de material. Estas limitaciones incrementan la incertidumbre asociada a las mediciones, evidenciando la

necesidad de incorporar herramientas de inspección que permitan una caracterización más completa de las anomalías presentes, optimizando a su vez los tiempos de intervención en campo.

3.1.1. Inspección Directa Tradicional de Anomalías

La inspección directa de anomalías geométricas en ductos comprende la medición y caracterización de deformaciones tales como abolladuras y ovalidades. La profundidad de una abolladura se determina generalmente como la distancia máxima entre el punto de mayor depresión de la superficie del ducto y la referencia que representa el diámetro externo original del tubo. La caracterización geométrica se complementa con la medición de dimensiones longitudinales y transversales, la estimación de radios de curvatura locales y la evaluación de ovalidad mediante la comparación de diámetros máximos y mínimos en una misma sección transversal.

Si bien estos métodos son ampliamente utilizados en la industria, presentan limitaciones en términos de precisión y en la correcta representación de la geometría real del daño cuando se aplican en condiciones reales de excavación, lo que puede introducir incertidumbre en la evaluación estructural del ducto.

3.1.2. Limitaciones de la Medición Directa en Condiciones Reales de Campo

Una de las principales dificultades se presenta cuando la anomalía geométrica se encuentra cercana o coincidente con una soldadura circunferencial. En estos casos, el uso de una regla comparadora requiere que la herramienta se apoye sobre dos puntos de una misma generatriz longitudinal. Sin embargo, en la práctica, las soldaduras circunferenciales suelen presentar pequeñas desalineaciones geométricas, propias del proceso constructivo. Esta discontinuidad geométrica genera una referencia imperfecta para la regla, provocando mediciones erróneas de profundidad, ya sea por subestimación en un lado de la soldadura circunferencial o por sobreestimación en el otro.

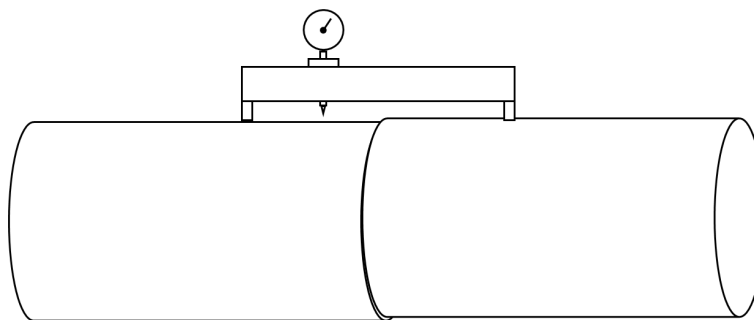


Figura 1. Medición con regla comparadora. Soldadura circunferencial desalineada.

De manera similar, cuando el ducto presenta una curvatura global, ya sea en el plano horizontal y/o vertical, la referencia lineal utilizada por los métodos tradicionales deja de representar adecuadamente el contorno original del tubo. En estas situaciones, la medición directa mezcla los efectos de la curvatura global del trazado con la deformación local de la abolladura, introduciendo errores sistemáticos difíciles de cuantificar y corregir.

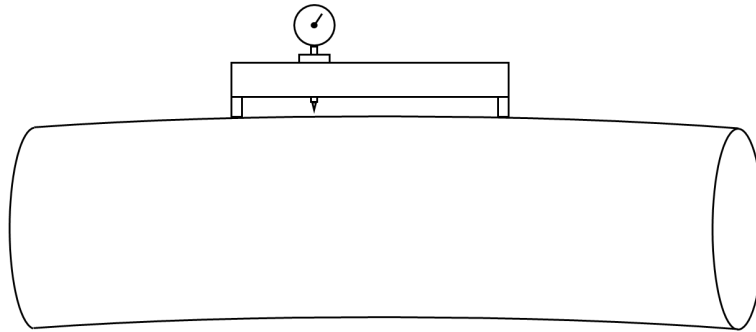


Figura 2. Medición con regla comparadora. Ducto curvado.

La medición de ovalidad en campo constituye otro aspecto particularmente complejo, ya que requiere la determinación de diámetros máximos y mínimos en una misma sección transversal, lo que implica el acceso a múltiples posiciones angulares alrededor del ducto. En ductos de gran diámetro, esta condición suele limitar las mediciones a evaluaciones parciales, con una alta dependencia del criterio del operador y una incertidumbre significativa respecto de la ovalidad real y de la dirección de la deformación.

De forma análoga, la determinación de curvaturas locales, especialmente en la zona del hombro de una abolladura, resulta altamente sensible al método de medición empleado. Las técnicas basadas en galgas o mediciones puntuales pueden suavizar o distorsionar la geometría real, dificultando la identificación precisa del radio mínimo de curvatura requerido, por ejemplo, para los análisis de deformación conforme a ASME B31.8 Apéndice R.

En conjunto, estas limitaciones generan dispersión en los resultados, dependencia del operador y reducen la confiabilidad de los análisis estructurales posteriores, impactando directamente en la toma de decisiones asociadas a la gestión de integridad del ducto.

3.1.3. Alcance del Problema

El problema se manifiesta principalmente en la etapa de inspección directa y caracterización geométrica en campo, donde los métodos tradicionales de medición por contacto resultan insuficientes para representar con fidelidad la geometría real del daño.

Se identifica así la necesidad de una metodología que permita reemplazar las técnicas tradicionales de medición directa y que proporcione una caracterización geométrica completa, precisa y trazable de las anomalías detectadas. La aplicación del escaneo 3D en campo surge así como una alternativa, capaz de capturar la superficie externa completa del ducto, independientemente de desalineaciones constructivas y curvaturas globales, y de obtener a partir de ella los parámetros geométricos requeridos por las normativas de integridad con un nivel de detalle, consistencia y trazabilidad superior al de los métodos convencionales.

3.2. Metodología

La metodología aplicada en este trabajo tiene como objetivo la caracterización de anomalías geométricas y evidencias geométricas asociadas a daño volumétrico mediante la utilización de escaneo 3D en campo como herramienta de medición directa avanzada. El enfoque adoptado reemplaza técnicas tradicionales de medición manual por contacto y permite integrar los resultados obtenidos con criterios normativos vigentes para la evaluación de aptitud para el servicio.

3.2.1. Principios del Escaneo 3D Aplicado a Ductos

El escaneo 3D es una técnica de adquisición geométrica sin contacto que permite reconstruir la superficie externa de un objeto mediante la generación de una nube de puntos tridimensional. Esta tecnología permite capturar la geometría real de abolladuras, ovalidades y deformaciones locales,

independientemente de desalineaciones, curvaturas globales o interferencias que afectan a los métodos tradicionales por contacto.

A diferencia de mediciones puntuales o lineales, el escaneo 3D registra la totalidad de la superficie inspeccionada, lo que posibilita obtener parámetros geométricos tales como profundidad efectiva de abolladuras, distribución espacial de la deformación, radios de curvatura locales, geometría del hombro del daño y variaciones de la sección transversal asociadas a ovalidades.

El carácter digital y trazable de los datos permite repetir mediciones, realizar comparaciones futuras y utilizar los modelos generados como insumo directo para evaluaciones avanzadas, incluyendo simulaciones numéricas por elementos finitos cuando se requieren niveles de detalle superiores.

Equipamiento Utilizado

En los últimos años, las tecnologías de escaneo 3D experimentan un desarrollo significativo, con disponibilidad de equipos portátiles capaces de operar con niveles de precisión adecuados para aplicaciones de ingeniería en condiciones de campo. En particular, los sistemas ópticos basados en luz estructurada o láser azul resultan aptos para capturar geometrías complejas sobre superficies metálicas, incluso en entornos con iluminación variable o acceso limitado.

Para la adquisición de las geometrías relevadas en los casos presentados, se utiliza un escáner portátil CR-Scan Raptor (Creality), basado en tecnología de luz azul estructurada. El sistema reconstruye superficies mediante la proyección de múltiples líneas de luz y la captura de su deformación a través de un sistema óptico de alta resolución. El equipo presenta una precisión nominal declarada por el fabricante de hasta 0,02 mm en condiciones controladas, adecuada para la caracterización de abolladuras, ovalidades y deformaciones locales en ductos bajo condiciones reales de excavación.

Entre las características operativas se destaca la capacidad de escanear superficies metálicas u oscuras sin requerir tratamientos superficiales adicionales, así como su diseño portátil, que facilita su uso en excavaciones y espacios reducidos. El funcionamiento en modo activo (emisión propia) reduce la dependencia de las condiciones de iluminación externa, permitiendo una adquisición estable y repetible en campo.



Figura 3. Escaner 3D Raptor – Creality.

El procesamiento de datos se realiza mediante el software Creality Scan (v3.1.6), instalado en laptops con procesadores Intel Core i7 de séptima generación, 16 GB de RAM y tarjeta gráfica dedicada Nvidia 1650M. Este software permite captura en tiempo real, visualización 3D en campo y posprocesamiento de modelos mediante mallas de alta densidad exportables en formato PLY, facilitando su análisis posterior en herramientas de evaluación dimensional y estructural.

3.2.2. Adquisición de Datos Mediante Escaneo 3D en Campo

La adquisición de datos se ejecuta sobre secciones de ducto previamente expuestas mediante excavación, limpieza y remoción del revestimiento. En cada caso, se delimitan los tramos de interés considerando un margen mínimo de 30 cm antes y después de la anomalía reportada por ILI, incluyendo soldaduras circunferenciales próximas cuando corresponde.

Se colocan marcadores reflectivos con una separación máxima de 10 cm para asegurar una correcta referenciación espacial durante el escaneo. La calibración del dispositivo se ejecuta en campo conforme al procedimiento especificado por el fabricante.

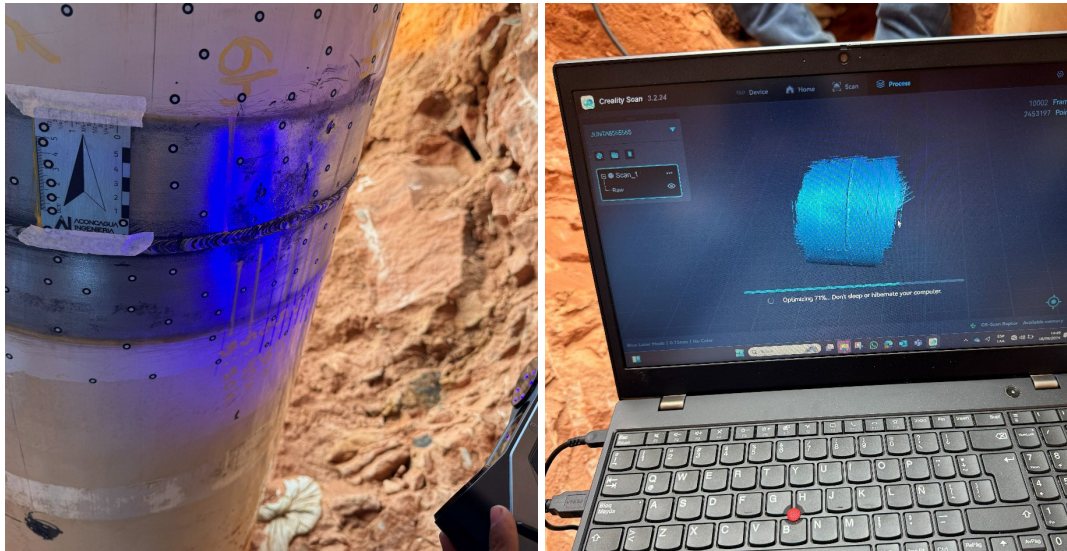


Figura 4. Ejemplo de ejecución de escaneo en campo.

La duración típica por escaneo completo (incluyendo calibración, captura y revisión preliminar) se ubica entre 15 y 25 minutos por punto de interés, dependiendo de las condiciones de iluminación, acceso y extensión de la zona a capturar.

Finalizada la captura, se exporta la nube de puntos y se aplican procesos de optimización (remallado, filtrado y ajuste de resolución), obteniendo modelos triangulados de alta densidad (del orden de millones de caras), listos para su análisis dimensional.

Comparación con Metodologías Tradicionales

En comparación con métodos convencionales de inspección externa por contacto (calibres, reglas comparadoras, galgas u otros relevamientos manuales) el escaneo 3D presenta ventajas operativas y técnicas:

- Reducción de tiempo operativo: una medición manual detallada puede demandar más de una hora por zona, mientras que el escaneo completo de una abolladura se ejecuta típicamente en menos de 30 minutos, incluyendo posprocesamiento básico.
- Reducción de subjetividad: el modelo digital permite analizar con precisión los contornos reales de la deformación con menor dependencia del criterio del operador.
- Mayor cobertura geométrica: se captura el perfil completo del ducto, no solo el eje longitudinal de la abolladura, permitiendo identificar deformaciones distribuidas, ovalidad, protuberancias u ondulaciones.
- Detección de irregularidades locales: la resolución submilimétrica permite identificar pequeñas depresiones, pliegues u ondulaciones de difícil detección mediante inspección visual.

- Trazabilidad digital: la nube de puntos conserva un registro reproducible de la geometría para evaluaciones futuras o para simulaciones por elementos finitos.

Calibración in situ

Previo a cada sesión de escaneo se ejecuta una calibración óptica del sistema utilizando la placa patrón de alta precisión provista por el fabricante. La placa incluye una matriz codificada y un identificador asociado al equipo que permite ajustar parámetros internos de alineación de cámaras, ángulo del proyector y respuesta del sensor. El procedimiento se realiza desde el software del fabricante siguiendo la rutina de calibración guiada.

La calibración in situ resulta necesaria para mantener la calidad metrológica del escaneo en campo, ya que factores ambientales pueden afectar la captura si no se compensan adecuadamente. Entre los principales se incluyen:

- Variaciones de iluminación ambiente, que pueden saturar el sensor o interferir con la visibilidad de las líneas proyectadas.
- Humedad o polvo en suspensión, que desvían o atenúan el haz.
- Cambios térmicos entre transporte, montaje y operación, que pueden afectar la alineación interna del sistema óptico.

La calibración realizada en el entorno operativo ajusta el equipo a las condiciones reales del sitio, reduciendo errores sistemáticos y evitando desviaciones dimensionales acumulativas, especialmente cuando se requiere fusión de múltiples vistas (hermanado de escaneos parciales).



Figura 5. Placa de calibración.

Como todo instrumento de medición dimensional, el sistema requiere rutinas periódicas de verificación y control metrológico a lo largo del tiempo para asegurar consistencia y confiabilidad de los datos adquiridos.

3.2.3. Procesamiento y Análisis Geométrico de los Modelos

Una vez obtenida la nube de puntos mediante escaneo 3D, se realiza el procesamiento digital para su evaluación dimensional. El flujo de trabajo se estructura en las siguientes etapas: validación y limpieza de la nube, generación de geometría ideal de referencia, alineación de modelos y comparación cuantitativa entre superficies. Este proceso permite identificar deformaciones reales sobre el ducto y extraer parámetros para la evaluación de integridad estructural.



Figura 6. Flujo de procesamiento geométrico.

Validación, Limpieza y Optimización de la Nube de Puntos

La nube de puntos se verifica en escala utilizando patrones conocidos previamente escaneados (bloques patrón). En general, si la captura se realiza con calibración previa correcta, no se requieren ajustes. Si se detecta discrepancia entre la medida digital y el valor real del patrón, se aplica una corrección de escala, evitando errores acumulativos en el análisis comparativo.

Validada la escala, se realiza la limpieza de la nube eliminando elementos espurios, interferencias ópticas o ruido generado por el entorno (reflejos, bordes de sombra, etc.), cuidando de conservar detalle en zonas de interés.

Luego se genera una malla triangulada optimizada, típicamente con resolución del orden de 0,10 mm entre nodos, representando con alta fidelidad la forma real del ducto y reduciendo la carga computacional para etapas posteriores.

Geometría de Referencia

Se genera un modelo 3D de referencia; en el caso de ductos, corresponde a un cilindro perfecto de diámetro nominal. Este modelo representa la geometría ideal sin deformaciones y se utiliza como base para la comparación con el modelo escaneado.

Alineación de Modelos

Con la malla optimizada y la geometría de referencia definida, se alinea el modelo escaneado con el cilindro ideal mediante algoritmos de ajuste por minimización de errores. Para la alineación se seleccionan zonas con mínima deformación, estableciendo un sistema de referencia común entre ambos modelos.

Comparación Geométrica y Obtención de Parámetros

La alineación permite comparar cada punto de la superficie escaneada con su equivalente teórico, identificando desplazamientos radiales locales, depresiones, elevaciones o pérdidas de simetría. A partir de esta comparación se determinan los parámetros geométricos necesarios para la evaluación estructural, con una resolución superior a la alcanzable mediante métodos tradicionales por contacto.

Entre los principales parámetros determinados se incluyen:

- Profundidad efectiva de la abolladura.
- Extensión longitudinal y circunferencial del daño.
- Perfil geométrico del hombro de la abolladura.
- Radios mínimos de curvatura local.
- Variaciones de sección transversal y ovalidad.
- Distribución angular de las deformaciones.

Estos parámetros constituyen datos de entrada para metodologías basadas en deformación, tales como ASME B31.8 Apéndice R, así como para estimación de vida remanente a la fatiga conforme a API RP 1183.

Los modelos tridimensionales pueden exportarse para su utilización en análisis numéricos por elementos finitos, lo cual resulta relevante en evaluaciones de mayor detalle, por ejemplo, en análisis de Nivel 3 según API 579-1 / ASME FFS-1.

3.2.4. Integración con la Evaluación Normativa

Una vez procesada y alineada la geometría tridimensional obtenida del escaneo 3D, se realiza la evaluación estructural de las anomalías conforme a criterios normativos reconocidos internacionalmente. El análisis tiene como finalidad determinar la aptitud para el servicio (FFS) de cada sector afectado, estimar vida remanente y definir la necesidad (o no) de aplicar acciones correctivas.

ASME B31.8 – Análisis de Deformación Geométrica

La norma ASME B31.8 (“Gas Transmission and Distribution Piping Systems”) establece los fundamentos para el diseño, construcción y operación segura de sistemas de tuberías de gas. En su sección 851.4.1, se definen los tipos de abolladuras y su impacto sobre la integridad estructural del ducto. En particular, la norma diferencia entre:

- Abolladuras simples: depresiones lisas, sin pliegues ni interacción con soldaduras o pérdida de espesor.
- Abolladuras complejas: aquellas que coinciden con otras amenazas como corrosión, daño mecánico o presencia de soldaduras.

La norma establece que las abolladuras simples son aceptables si su profundidad no supera el 6% del diámetro externo del ducto, y si la deformación local no excede ciertos límites basados en el alargamiento permisible del material. Para verificar esto, se requiere calcular:

- ϵ_1 : deformación circunferencial por flexión
- ϵ_2 : deformación longitudinal
- ϵ_3 : deformación extensiva
- ϵ_{eq} : deformación equivalente combinada

Estas se obtienen utilizando los modelos matemáticos propuestos en el Apéndice R, a partir de los parámetros dimensionales de la abolladura (profundidad, largo, ancho, radios de curvatura).

API RP 1183 – Evaluación de Abolladuras en Servicio

La práctica recomendada API RP 1183 ("Assessment and Management of Pipeline Dents") proporciona un marco integral para evaluar la severidad estructural de abolladuras detectadas en operación, considerando no solo su forma geométrica, sino también el historial de presiones y la probabilidad de falla por fatiga.

El análisis bajo API RP 1183 se estructura en tres componentes:

- Screening geométrico: permite determinar si una abolladura puede descartarse como no crítica en base a profundidad (<6% OD), interacción con soldaduras, o ausencia de daño volumétrico.
- Cálculo de deformación equivalente (ϵ): similar al enfoque de ASME, pero enfocado en condiciones operativas y utilizando factores de severidad para deformaciones locales.
- Análisis de vida remanente a la fatiga: mediante el concepto de Spectrum Severity Indicator (SSI), se evalúa la durabilidad de la abolladura frente a ciclos de presión. Si el SSI está por debajo de un umbral definido (según profundidad y forma), se considera que no es necesaria una evaluación más profunda.

API 579-1 / ASME FFS-1 – Fitness For Service, Part 12

La norma API 579 / ASME FFS-1, en su Parte 12, establece los procedimientos para la evaluación detallada de abolladuras, ya sea simples o combinadas con otros tipos de daño (corrosión, grietas, etc.). Este estándar presenta tres niveles de evaluación:

- Nivel 1: simplificado, basado en comparaciones con límites geométricos estándar (ej. profundidad <7% OD si no hay soldadura cercana; <4% si está a <25 mm de una soldadura).
- Nivel 2: considera datos operativos y permite un enfoque más conservador mediante diagramas de evaluación y ecuaciones de estado límite.
- Nivel 3: incluye simulaciones mediante elementos finitos (FEA) y exige mallas geométricas de alta fidelidad, como las que pueden ser generadas por escaneo 3D.

La metodología permite evaluar no solo la abolladura, sino también su interacción con otras amenazas, siendo aplicable a escenarios de alta criticidad estructural o de daño combinado.

3.3. Casos de Estudio

A continuación, se presentan tres casos representativos que ilustran la aplicabilidad del escaneo 3D para abordar escenarios con distinta complejidad geométrica, restricciones de acceso y requerimientos de análisis estructural detallado.

3.3.1. Caso 1

Anomalía geométrica con daño volumétrico y afectación de soldadura circunferencial.

Descripción

La anomalía analizada en este caso es detectada inicialmente mediante inspección interna (ILI) en un gasoducto de 18" de diámetro nominal. La herramienta de inspección reporta la presencia de una abolladura con una profundidad estimada del 3,2% del diámetro exterior, una longitud aproximada de 74 mm y un ancho de 253 mm. La indicación se localiza a una distancia de 0,07 m aguas abajo de una junta circunferencial, con una posición horaria de 04:11.

Adicionalmente, el análisis ILI indica la posible presencia de pérdida de metal centralizada en la zona de máxima deformación geométrica, así como la interacción de la abolladura con la soldadura circunferencial. Debido a la combinación de deformación geométrica, indicios de daño volumétrico y afectación de soldadura circunferencial, la anomalía se clasifica como compleja, lo que motiva la ejecución de una inspección directa en campo para su caracterización detallada.

POSICIÓN HORARIA	DISTANCIA A JUNTA AGUAS ABAJO	ANCHO	LARGO	PROFUNDIDAD (%OD)
04:11	0.07m	253mm	74mm	3.2%

Tabla 1. Características de la anomalía. Caso 1.

Caracterización Geométrica

Durante la inspección directa se realiza un escaneo 3D de la zona afectada, obteniéndose un modelo tridimensional de alta resolución que permite caracterizar con mayor precisión la geometría real de la abolladura y su relación con la soldadura circunferencial. A partir del análisis geométrico del modelo escaneado se determinan los siguientes parámetros principales:

- Profundidad máxima de la abolladura: 3,98 mm (0,87% del diámetro nominal).
- Extensión longitudinal: 185 mm.
- Extensión circunferencial: 145 mm.
- Radio de curvatura circunferencial mínimo: 1227 mm
- Radio de curvatura longitudinal mínimo: 696 mm



Figura 7. Defecto. Caso 1.



Figura 8. Escaneo defecto. Caso 1.

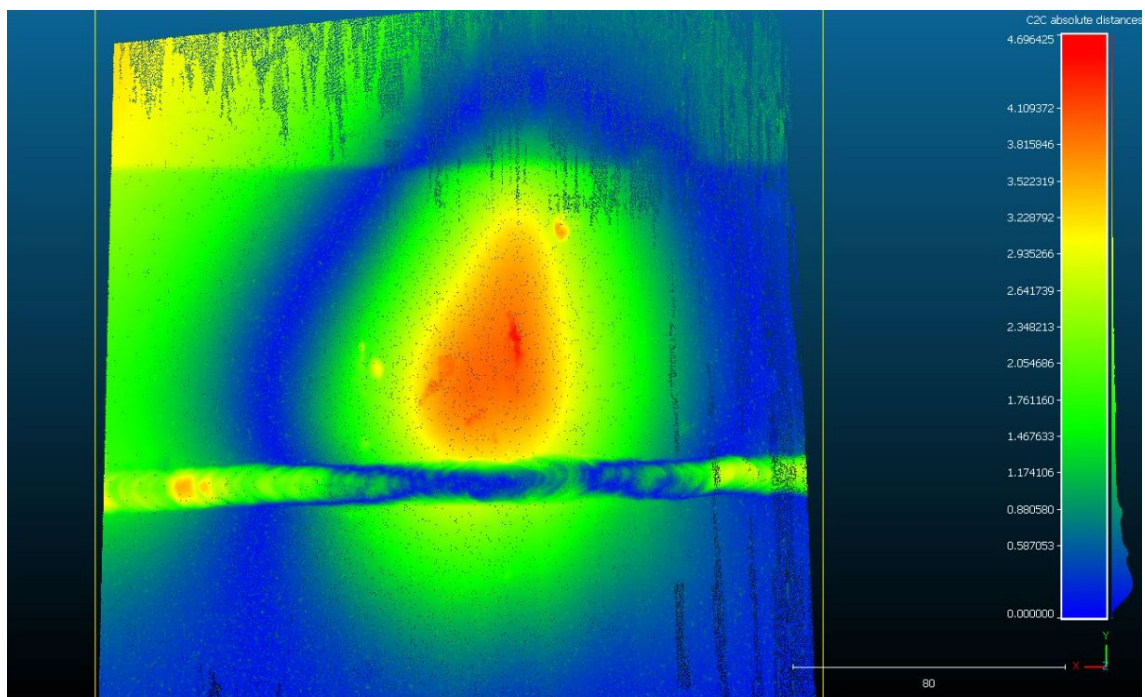


Figura 9. Escaneo defecto. Profundidad. Caso 1.

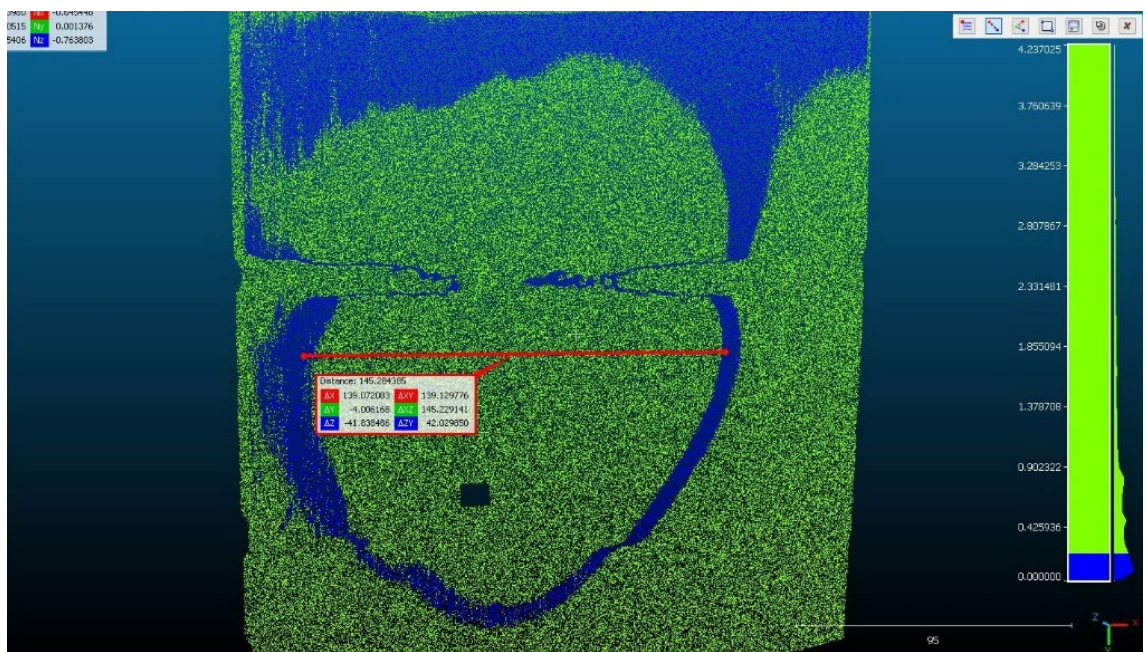


Figura 10. Ancho 145mm. Caso 1.

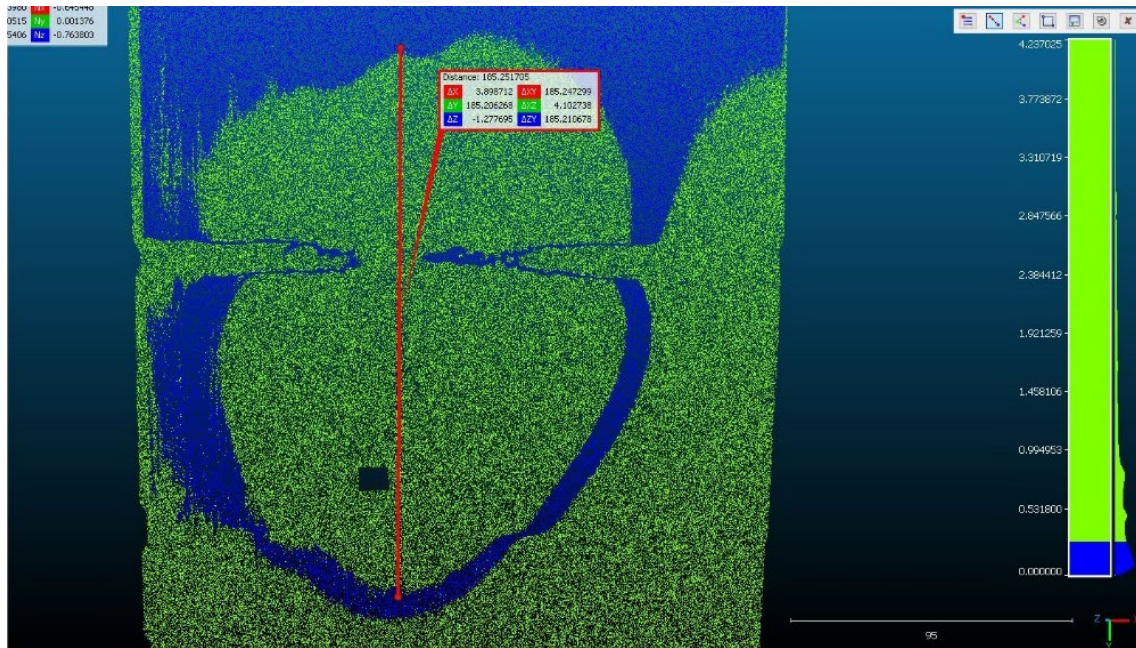


Figura 11. Largo 185mm. Caso 1.

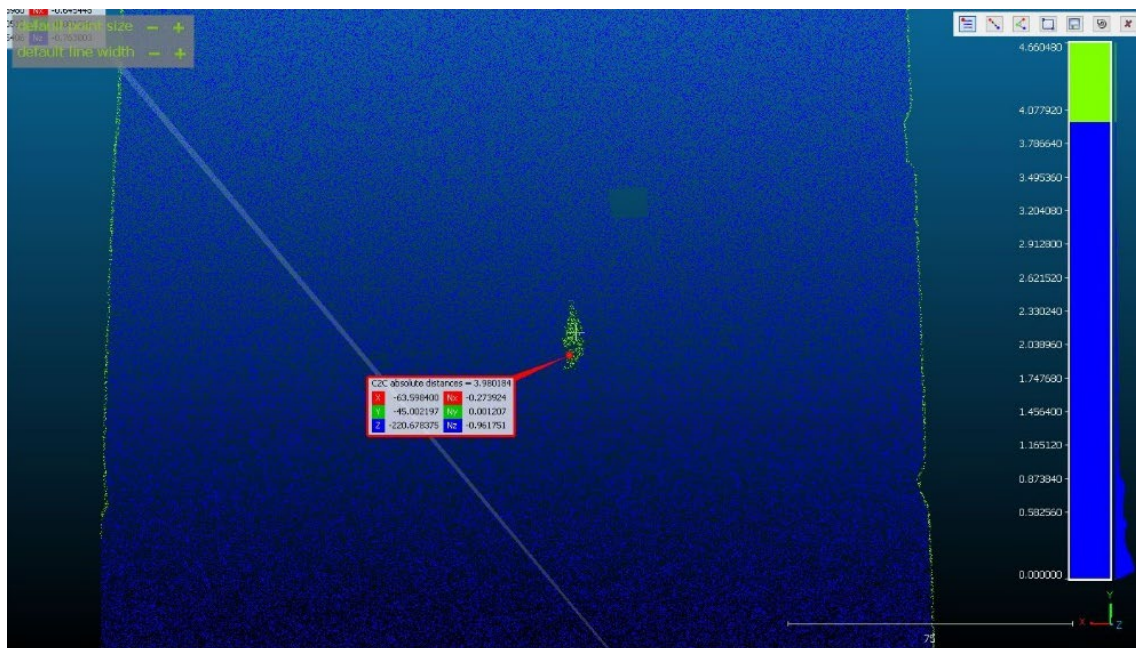


Figura 12. Profundidad 0,87%. Caso 1.

El análisis del escaneo 3D permite además identificar y cuantificar indicaciones superficiales compatibles con daño mecánico superpuesto a la deformación geométrica. Estas indicaciones presentan:

- Profundidad máxima: 0,8 mm.
- Extensión longitudinal máxima: 65 mm.

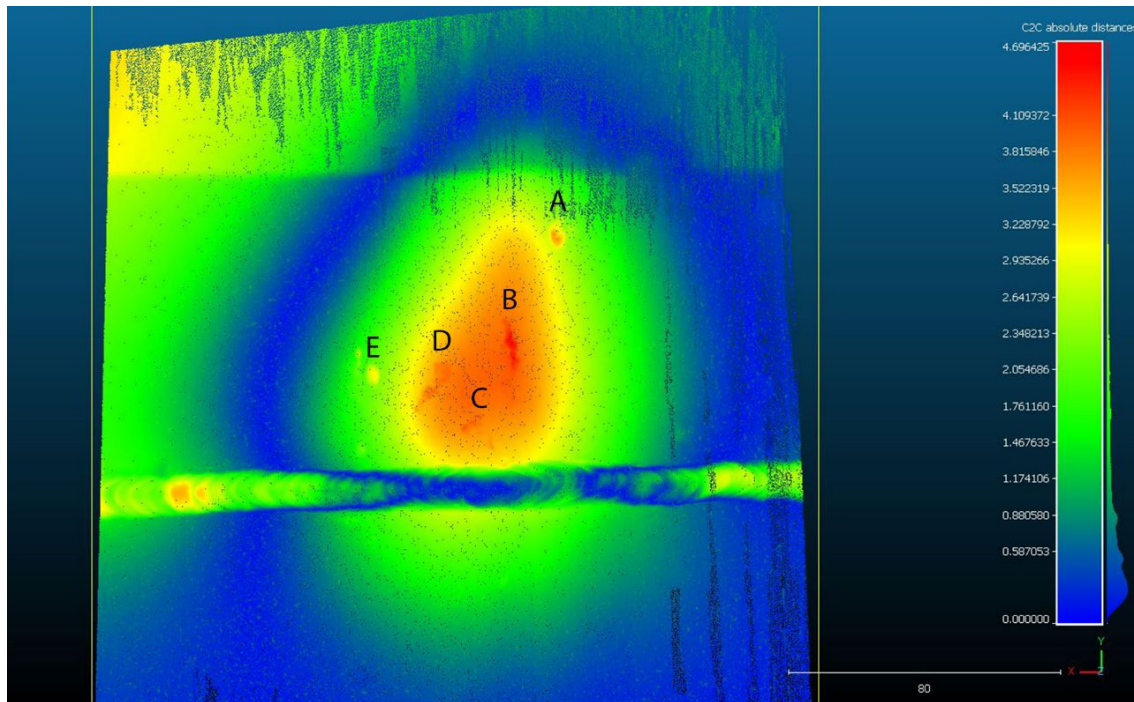


Figura 13. Anomalías Volumétricas. Caso 1.

Evaluación de Integridad

Los parámetros geométricos obtenidos mediante escaneo 3D se utilizan como datos de entrada para la evaluación estructural conforme a ASME B31.8 Apéndice R y para el análisis de vida remanente a la fatiga.

Desde el punto de vista estrictamente geométrico, la profundidad de la abolladura determinada mediante escaneo 3D resulta inferior al 2% del diámetro nominal, valor aceptable para una soldadura circunferencial dúctil de acuerdo con ASME B31.8. Sin embargo, la presencia de daño mecánico externo clasifica la anomalía como perjudicial para la integridad del ducto, conforme a lo establecido en ASME B31.8 párrafo 851.4.1, independientemente de la profundidad de la abolladura.

En función de las dimensiones y profundidad de las indicaciones de daño mecánico, y considerando las condiciones operativas del ducto, se determina que la reparación mediante amolado controlado resulta técnicamente viable dentro de los límites establecidos por ASME B31.8. El escaneo 3D permite verificar que la extensión longitudinal requerida para la remoción de los concentradores de tensiones se encuentra dentro de los valores admisibles, posibilitando la definición de una reparación definitiva sin necesidad de reemplazo de segmento ni instalación de refuerzos adicionales.

Este caso evidencia la importancia del escaneo 3D para discriminar entre severidad geométrica aparente reportada por ILI y geometría real del daño, así como para identificar concentradores de tensiones asociados a daño mecánico externo, que resultan determinantes en la evaluación normativa de la integridad del ducto y en la determinación de las acciones correctivas.

3.3.2. Caso 2

Abolladura oculta bajo recubrimiento de hormigón

Descripción

La anomalía analizada en este caso es detectada mediante inspección interna (ILI). La herramienta de inspección reporta una abolladura clasificada como compleja, con una profundidad estimada del 4,6% del diámetro exterior, una longitud aproximada de 354 mm y un ancho de 319 mm, ubicada en la posición horaria 04:32 y a una distancia de 667 mm de la soldadura circunferencial aguas abajo. Si bien la hoja de excavación indica que la abolladura no se encuentra directamente sobre la soldadura, su proximidad motiva su clasificación inicial como compleja.

El análisis histórico de inspecciones internas evidencia que, en campañas anteriores, se registran indicaciones de anomalía de diámetro interno en la misma ubicación, sin detección de pérdida de metal en ninguna de las corridas. Estos antecedentes sugieren la presencia de una deformación antigua, posiblemente asociada a la etapa de instalación del ducto.

Durante la excavación se constata que la zona donde se centra la abolladura reportada por la inspección ILI se encuentra cubierta por un recubrimiento de hormigón, condición que no se encuentra documentada en los planos conforme a obra. La inspección visual confirma que la abolladura no coincide con la soldadura circunferencial.



Figura 14. Recubrimiento de hormigón. Caso 2.

Dado que el recubrimiento de hormigón impide el acceso directo a la superficie del ducto en la zona de la abolladura, no es posible realizar una caracterización geométrica directa de la deformación. En consecuencia, se evalúa la condición de la soldadura circunferencial y del segmento de ducto expuesto entre el recubrimiento de hormigón y la soldadura. La soldadura se inspecciona mediante ultrasonido (UT) y ensayo de tintas penetrantes (PT), no detectándose indicaciones relevantes y confirmándose su conformidad con la especificación aplicable.

Caracterización Geométrica

Se realiza un escaneo 3D del segmento expuesto del ducto, cubriendo la totalidad de la circunferencia accesible. El modelo tridimensional obtenido permite identificar desviaciones geométricas globales y locales en la zona de estudio.



Figura 15. Zona de Inspección. Caso2.

El análisis geométrico del modelo escaneado revela la presencia de una ovalidad del orden del 1,3% del diámetro externo nominal, valor que se encuentra dentro de las tolerancias establecidas por la norma API 5L para tuberías de este rango de diámetros.

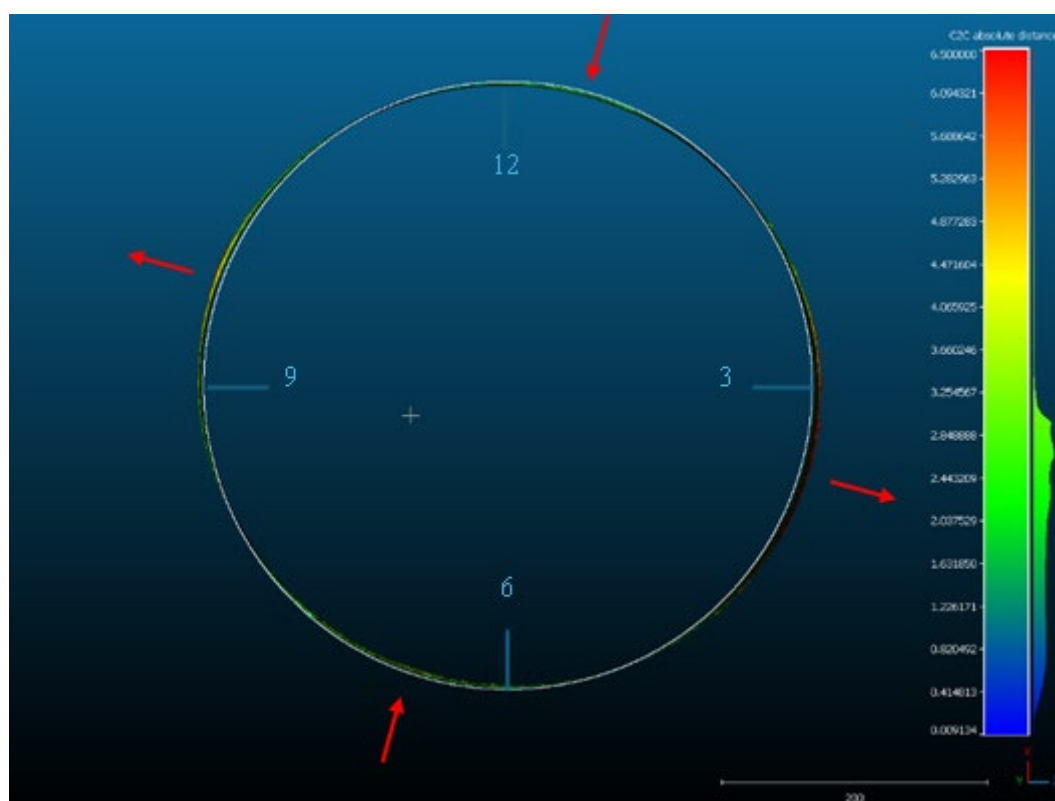


Figura 16. Vista de la sección. Dirección de la deformación. Caso 2.

Asimismo, se identifica una leve protuberancia localizada en la franja horaria comprendida entre las 03:00 y las 05:00, con un desplazamiento máximo aproximado de 1,5 mm, coincidente con la dirección de la abolladura reportada por la inspección interna.

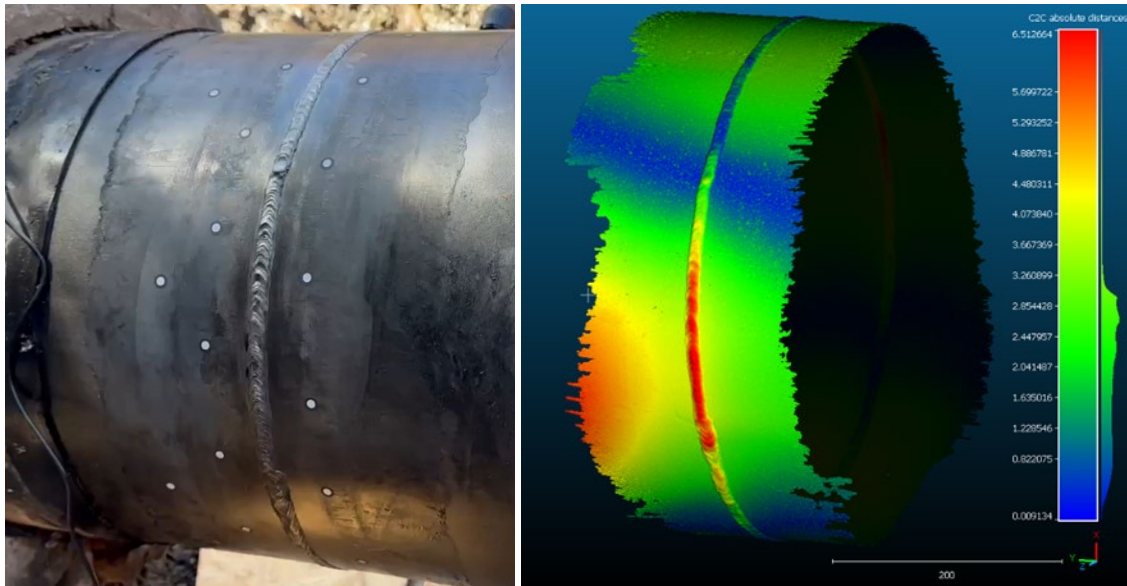


Figura 17. Indicación de protuberancia entre horas 03:00 y 05:00. Caso 2.

El escaneo 3D no permite identificar el hombro de la abolladura ni los límites físicos de la deformación, lo que indica que la abolladura se encuentra confinada dentro del recubrimiento de hormigón y que únicamente se manifiestan efectos geométricos indirectos sobre el tramo expuesto del ducto.

Evaluación de Integridad

Dado que no es posible medir directamente la geometría de la abolladura debido a la presencia del recubrimiento de hormigón, para la evaluación de aptitud para el servicio se adoptan los parámetros geométricos reportados por la inspección interna (ILI).

Conforme a ASME B31.8, las abolladuras simples que no afectan soldaduras circunferenciales y cuyas profundidades sean inferiores al 6% del diámetro nominal son aceptables desde el punto de vista geométrico. Considerando que la examinación directa confirma que la abolladura no interactúa con la soldadura circunferencial, la condición se evalúa bajo los criterios correspondientes a una abolladura simple.

Adicionalmente, se realizan evaluaciones de aptitud para el servicio conforme a API RP 1183 y API 579 Parte 12. Los resultados de estos análisis indican que:

- La deformación asociada a la abolladura es aceptable.
- La presión de falla del segmento no se ve reducida respecto de una tubería sin abolladura.
- La vida remanente a la fatiga supera ampliamente la vida operativa esperada del ducto.

En consecuencia, la abolladura evaluada en este caso se considera apta para continuar en servicio sin requerir acciones de remediación, bajo las condiciones operativas actuales.

Este caso demuestra que el escaneo 3D resulta una herramienta valiosa incluso cuando la abolladura no es accesible directamente, ya que permite evaluar deformaciones geométricas indirectas, verificar la condición de soldaduras cercanas y reducir la incertidumbre asociada a la interpretación de indicaciones ILI.

3.3.3. Caso 3

Escaneo de grapa de refuerzo submarina para análisis de causa raíz.

Descripción

En una instalación de transferencia de hidrocarburos mediante un sistema de terminal multiboyas, el movimiento de crudo y derivados se realiza a través de líneas submarinas de acero al carbono, de 12" de diámetro nominal y 9,53 mm de espesor, con una longitud del orden de 1,7 km. Como parte de los procedimientos operativos habituales, previo a cada operación de carga o descarga se ejecuta una prueba de estanqueidad a presión de operación durante un período determinado, tras la cual se inicia la transferencia de producto.

Luego de una prueba satisfactoria verificada mediante inspección submarina, se detecta posteriormente la presencia de una mancha superficial, confirmándose la existencia de una fuga asociada a un sistema de refuerzo mecánico tipo grapa, instalado previamente sobre la línea, ubicado a una distancia aproximada de 200 m del extremo marino. A partir de este evento, se requiere la determinación de la causa de la falla y la estimación del volumen derramado, lo que motiva el desarrollo de un análisis técnico orientado a la reconstrucción geométrica, la evaluación de componentes y el análisis de causa raíz, incorporando el escaneo 3D como herramienta central de caracterización.

Los antecedentes disponibles incluyen información proveniente de inspecciones internas realizadas en campañas previas, reportes de inspección submarina, documentación de mantenimiento y registros históricos de instalación de refuerzos mecánicos. La correlación de esta información evidencia que la ubicación del evento coincide con anomalías previamente reportadas y con la presencia de grapas instaladas como medida de contención.

Caracterización Geométrica

Las dos mitades de la grapa recuperada (lados A y B) se preservan y relevan dimensionalmente bajo cadena de custodia. Posteriormente, se realiza la digitalización tridimensional de ambas mitades mediante escaneo láser 3D, obteniéndose modelos de alta resolución que permiten:

- Capturar con precisión la geometría interna y externa del refuerzo.
- Identificar zonas de contacto y posibles intersticios entre grapa, elastómero y tubería.
- Documentar trayectorias geométricamente compatibles con el camino de fuga reportado.
- Respaldar el análisis comparativo entre la configuración real del refuerzo y la esperada para un sistema de sellado hermético.



Figura 18. Grapa recuperada. Caso 3.

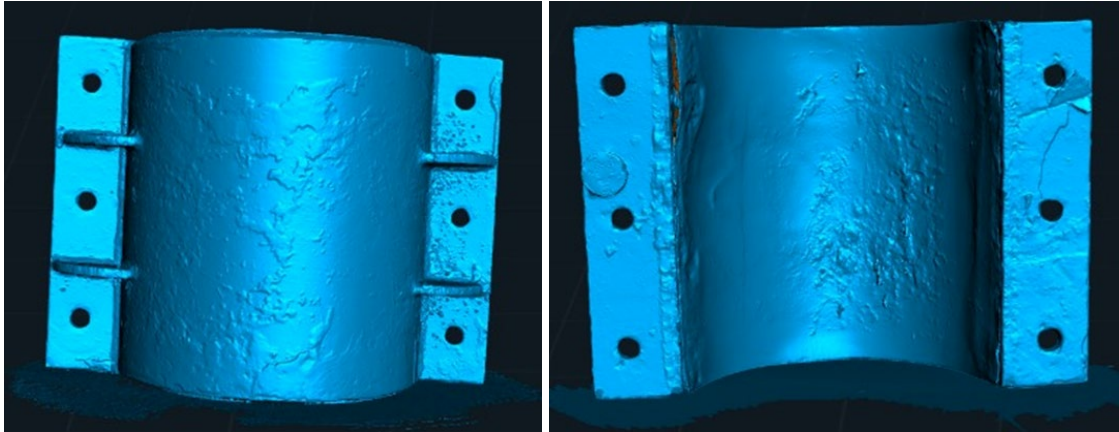


Figura 19. Escaneo 3D de grapa. Lado A. Caso 3.

El análisis geométrico se complementa con inspección visual detallada y mediciones de espesor por ultrasonido (UT) en los componentes, permitiendo integrar evidencias físicas directas con el modelo tridimensional digital.

Evaluación del Caso

El análisis comparativo evidencia que la grapa recuperada tras el evento no corresponde a la documentada en los registros disponibles, ni en términos de geometría ni en su configuración de montaje. Esta falta de correspondencia introduce una incertidumbre significativa respecto del diseño real del refuerzo instalado y de su condición efectiva en servicio, limitando la confiabilidad de los antecedentes históricos y reforzando la necesidad de una caracterización geométrica detallada del componente recuperado.

Desde el punto de vista geométrico y de montaje, se identifican evidencias compatibles con una instalación con restricciones de ajuste, tales como posiciones horarias condicionadas, incompatibilidades geométricas entre el refuerzo y la tubería, y una preparación superficial deficiente previa a la instalación. Estos factores pueden impedir el adecuado hermanado entre la grapa, el elastómero de sellado y la superficie del ducto, comprometiendo la hermeticidad del sistema y favoreciendo el ingreso de fluidos externos al intersticio.

A partir de los modelos tridimensionales obtenidos mediante escaneo 3D, se desarrollan simulaciones numéricas por elementos finitos con el objetivo de evaluar la capacidad del sistema de refuerzo para lograr un cierre hermético efectivo bajo las condiciones reales de geometría, montaje y propiedades del material del elastómero. Estas simulaciones permiten analizar la distribución de presiones de contacto entre la grapa, el elastómero y la tubería, así como la influencia de las tolerancias geométricas sobre la estanqueidad del conjunto.

Los resultados del análisis numérico indican que, bajo la geometría real relevada y con las características del elastómero identificado, no se garantiza un contacto uniforme ni una presión de sellado suficiente en toda la interfaz. Este comportamiento resulta consistente con las evidencias observadas en campo y con los hallazgos derivados de la inspección visual y los estudios de materiales, y respalda la hipótesis de una falla de sellado asociada al diseño y montaje real del refuerzo.

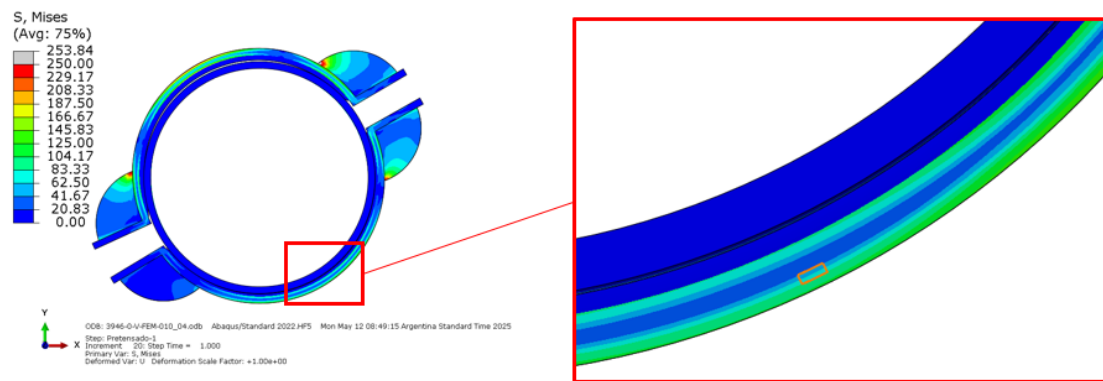


Figura 20. Simulación. Gap entre grapa y ducto lado A. Caso 3.

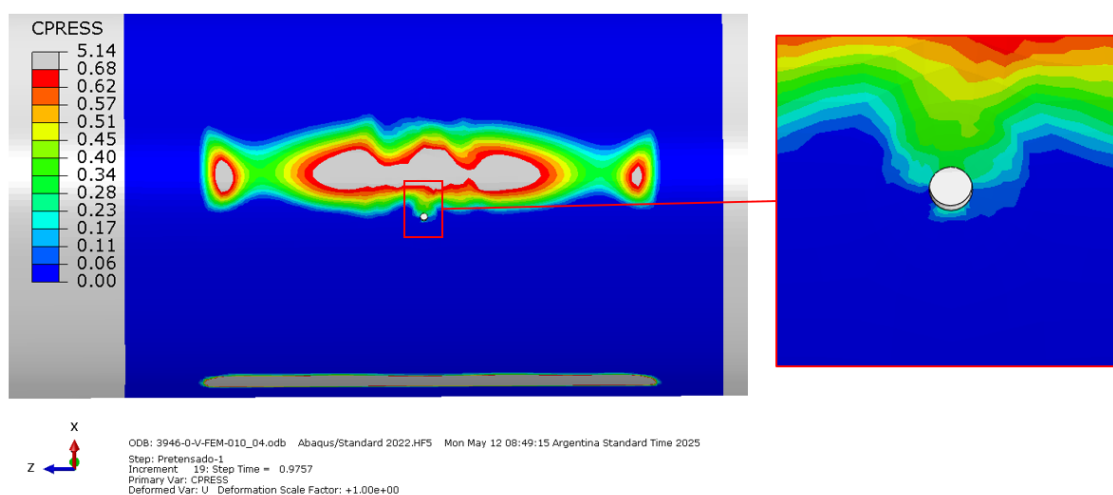


Figura 21. Simulación. Presión de contacto. Caso 3.

Este caso demuestra que el escaneo 3D constituye una herramienta clave no solo para la caracterización de anomalías geométricas en ductos, sino también para la evaluación de componentes asociados a la integridad, como refuerzos mecánicos tipo grapa. La combinación de digitalización tridimensional y simulaciones por elementos finitos permite reconstruir condiciones reales de montaje, reducir la incertidumbre en el análisis de causa raíz y aportar evidencia objetiva en escenarios donde los antecedentes documentales son incompletos o inconsistentes.

4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la aplicabilidad del escaneo 3D en campo como una herramienta técnica complementaria para la caracterización geométrica avanzada de anomalías detectadas mediante inspección interna (ILI), así como para la evaluación de integridad estructural en escenarios donde la inspección directa tradicional presenta limitaciones operativas y metrológicas. En particular, el escaneo 3D se consolida como una alternativa robusta frente a las mediciones manuales por contacto durante la etapa de verificación en campo.

La captura tridimensional sin contacto permite obtener registros completos, reproducibles y trazables de la superficie externa del ducto y de componentes asociados, reduciendo la dependencia del operador y las incertidumbres introducidas por condiciones típicas de campo, tales como desalineaciones en soldaduras circunferenciales, curvaturas globales del trazado y restricciones de acceso. A partir del posprocesamiento de los modelos digitales, se obtienen

parámetros geométricos clave (profundidad efectiva, extensión longitudinal y circunferencial, radios mínimos de curvatura, distribución angular de deformaciones y ovalidad) con un nivel de consistencia y fidelidad difícil de alcanzar mediante métodos manuales.

Los casos analizados evidencian que la mejora en la calidad del dato geométrico impacta directamente en la toma de decisiones de integridad. En abolladuras cercanas a soldaduras circunferenciales, el escaneo 3D permite discriminar con mayor precisión la geometría real del daño y fortalecer los criterios de aceptabilidad estructural. En escenarios con daño mecánico externo superpuesto, facilita la correcta delimitación de concentradores de tensiones y respalda la definición de reparaciones factibles, como el amolado controlado dentro de los límites normativos. Asimismo, en abolladuras inaccesibles debido a recubrimientos de hormigón, el escaneo 3D permite evaluar deformaciones geométricas indirectas y verificar la no interacción con soldaduras circunferenciales mediante inspección complementaria, reduciendo la incertidumbre del diagnóstico aun sin acceso directo a la deformación.

Desde el punto de vista normativo, los parámetros derivados de los modelos 3D se integran de forma coherente en los marcos de evaluación establecidos por ASME B31.8 (Apéndice R), API RP 1183 y API 579-1 / ASME FFS-1, mejorando la confiabilidad de los datos de entrada requeridos por metodologías basadas en deformación y evaluaciones de aptitud para el servicio. Adicionalmente, la disponibilidad de modelos tridimensionales de alta fidelidad habilita, cuando es necesario, la aplicación de evaluaciones de mayor nivel de detalle mediante simulaciones numéricas por elementos finitos, como se ilustra en el caso de refuerzos mecánicos tipo grapa.

Los tres casos analizados representan escenarios frecuentes dentro de programas de integridad de ductos y, en todos ellos, el escaneo 3D demostró ser una herramienta complementaria a la inspección directa tradicional, reduciendo la incertidumbre asociada a la caracterización geométrica y mejorando la calidad de los datos de entrada para evaluaciones normativas. En este contexto, la metodología presentada constituye un enfoque replicable para la caracterización avanzada de anomalías complejas y para el soporte técnico de decisiones de aceptación, monitoreo o remediación en sistemas de transporte de hidrocarburos.

5. Definiciones

Abolladura: Deformación localizada de la superficie externa de un ducto hacia su interior, producida por la acción de una carga externa, que no implica pérdida de material. Puede presentarse como una deformación simple o combinada con otras amenazas.

Abolladura Compleja: Abolladura que interactúa o coincide con otras amenazas, tales como soldaduras circunferenciales, corrosión, daño mecánico o grietas. Requiere una evaluación estructural bajo criterios normativos más restrictivos.

Anomalía: Condición o indicación detectada en un ducto mediante inspección interna (ILI) u otros métodos de inspección, que puede comprometer su integridad estructural.

Anomalía Volumétrica: Pérdida localizada de material en la pared del ducto, causada por corrosión, desgaste o daño mecánico, que reduce el espesor remanente.

As-found: Condición real de un componente o sistema al momento de su inspección o relevamiento, tal como se encuentra en servicio, sin correcciones ni idealizaciones geométricas.

Deformación Equivalente: Magnitud escalar que combina las componentes de deformación circunferencial, longitudinal y extensiva, utilizada para evaluar la severidad estructural de una abolladura.

Errores Aleatorios: Variaciones impredecibles en las mediciones debidas a factores no controlables, que introducen dispersión en los resultados y pueden ser tratadas estadísticamente.

Errores Sistemáticos: Desviaciones consistentes y reproducibles en una medición, asociadas a limitaciones del método, del instrumento o del procedimiento empleado.

Escaneo 3D: Técnica de adquisición geométrica sin contacto que permite generar una representación tridimensional de alta resolución de la superficie de un objeto mediante la captura de una nube de puntos.

Fitness For Service (FFS): Evaluación estructural destinada a determinar si un componente con defectos o degradación puede continuar operando de forma segura bajo condiciones de servicio definidas.

Hombro de la Abolladura: Zona de transición entre la superficie no deformada del ducto y la región deprimida de la abolladura, caracterizada por un cambio abrupto de curvatura. Su identificación es clave para definir los límites físicos de la anomalía.

In-Line Inspection (ILI): Método de inspección no destructiva que utiliza herramientas instrumentadas que recorren el interior del ducto para detectar, localizar y dimensionar anomalías geométricas, volumétricas y planares.

Malla Triangulada: Superficie continua generada a partir de una nube de puntos mediante la interconexión de triángulos. Permite visualizar, analizar y exportar modelos tridimensionales para evaluación dimensional y simulaciones numéricas.

Modelo Ideal: Representación geométrica teórica del ducto sin deformaciones (cilindro perfecto), utilizada como referencia para la comparación con la geometría real obtenida por escaneo 3D.

Nube de Puntos (Point Cloud): Conjunto de coordenadas tridimensionales (x, y, z) obtenidas mediante escaneo 3D, que describen la superficie externa del objeto relevado y constituyen la base para el análisis geométrico y la generación de modelos tridimensionales.

Ovalidad: Deformación del perfil circular del ducto hacia una sección elíptica o irregular. Se expresa como el porcentaje de diferencia entre el diámetro máximo y mínimo respecto del diámetro nominal.

SSI (Spectrum Severity Indicator): Índice que cuantifica la severidad acumulada del espectro de ciclos de presión operativa de un ducto. Es utilizado por API RP 1183 para evaluar la susceptibilidad de una abolladura a fallas por fatiga.

6. Bibliografía

- ASME B31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems. American Society of Mechanical Engineers.
- API RP 1183 – Assessment and Management of Dents in Pipelines. American Petroleum Institute. 2020.
- API 579-1 / ASME FFS-1 – Fitness-For-Service, Part 12: Dents and Gouges. American Petroleum Institute / ASME. 2021.
- CORDER, I., CHATAIN, P.; EPRG Recommendations for the Assessment of the Resistance of Pipelines to External Damage, Proceeding of the EPRG/PRC 10th Biennial Joint Technical Meeting on Line Pipe Research, Cambridge, UK, April 1995.
- NACE SP0188-2006 – Discontinuity (Defect) Evaluation of Steel Structures Using a Visual Inspection Process. NACE International.
- Creality Scan 3.1.6 – Manual Técnico del Usuario. Documentación técnica del software de escaneo 3D utilizado.

7. CVs

7.1. Christopher Soriano

Título y lugar de estudio: Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Trayectoria: Ingeniero Mecánico Eléctrico con experiencia técnica en integridad de ductos, protección catódica, inspección de recubrimientos y control de corrosión en el sector de hidrocarburos y energía. Participa desde 2021 en evaluaciones de integridad de ductos de gas natural, inspecciones mediante ensayos no destructivos, evaluación de recubrimientos, seguimiento y validación de anomalías, y soporte a programas de gestión de integridad conforme a normas NACE/AMPP, ISO, API y ASME. Su desempeño se orienta a la seguridad, la confiabilidad operativa y el cumplimiento normativo.

Cargo actual en la empresa: Member at Large

7.2. Esteban Adrián Cáceres

Título y lugar de estudio: Ingeniero Electromecánico, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Trayectoria: Ingeniero Electromecánico con más de seis años de experiencia en el sector de Oil & Gas, especializado en desarrollo de productos y servicios tecnológicos, análisis de datos, automatización y supervisión técnica. Actualmente se desempeña en Aconcagua Ingeniería SAC, donde ejecuta proyectos de análisis de riesgo y procesamiento de datos de inspección interna (ILI), y desarrolla herramientas tecnológicas orientadas a la mejora de procesos internos. Cuenta además con experiencia en proyectos de tratamiento de efluentes, incluyendo aplicaciones en minería de litio, y en el desarrollo de soluciones de programación y automatización industrial (Python, VBA, PLC).

Cargo actual en la empresa: Líder de Desarrollo Tecnológico

7.3. Bernardo Elósegui

Título y lugar de estudio: Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Trayectoria: Ingeniero Mecánico con más de veintidós años de experiencia en el sector de Oil & Gas, especializado en Integridad Mecánica de Activos. Actualmente se desempeña en Aconcagua Ingeniería SAC, donde ejecuta proyectos de Evaluaciones de Aptitud para el Servicio, Análisis de Riesgo, Evaluación de Integridad de Facilidades. Inspector Certificado API STD 653 y API RP 580

Cargo actual en la empresa: Gerente Técnico