

MEJORA DEL OPEX: DETERMINACIÓN EN CAMPO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES MEDIANTE INDENTACION INSTRUMENTADA.

Martín González¹, Pablo Fazzini¹, Carlos Flores²

1. GIE S.A.-Área Integridad Mecánica – Argentina

2. Gas Natural Fenosa - Argentina

e-mail: fazzini@giegroup.net, mgonzalez@giegroup.net, carlosflores@gasnaturalfenosa.com

Sinopsis

Asegurar la integridad y aptitud para el servicio de recipientes, cañerías y otros componentes metálicos, requiere, en gran medida, de conocer las propiedades mecánicas de los materiales que los componen. Estas propiedades, como ser la tensión de fluencia o rotura, limitan y establecen las condiciones de operación a las que se pueden someter los equipos y, por diversos motivos, no siempre se encuentran disponibles.

En la mayoría de las ocasiones, el retiro de servicio de un equipo o componente, la interrupción de los procesos asociados, el lucro cesante generado y las operaciones necesarias para obtener una muestra del material con la que se pueda efectuar ensayos en laboratorio, hacen que esta determinación de propiedades sea excesivamente costosa, cuando no imposible de realizar, obligando a adoptar estimaciones excesivamente conservativas en las evaluaciones de los mismos.

Como alternativa al tradicional ensayo de tracción, la tecnología de Indentación Instrumentada Automática (ABI por sus siglas en inglés) permite establecer las propiedades mecánicas de componentes metálicos en servicio de modo no destructivo (END), obteniendo estimaciones confiables de tensión de fluencia y rotura. Esto supone ventajas considerables desde el punto de vista económico y, por sobre todo, en cuanto a la seguridad de operación de las instalaciones.

En este artículo se describe el funcionamiento de un indentador instrumentado automático, denominado ESYS10, desarrollado en colaboración entre una institución académica y una empresa de servicios de ingeniería.

Luego, se presenta el proceso de validación conjunta del equipo con una empresa distribuidora de gas del norte de Buenos Aires para diferentes tuberías de acero al carbono. Finalmente, diversas aplicaciones prácticas recientes realizadas en industrias del sector gas y petróleo de la Argentina y del Perú.

1. INTRODUCCIÓN

Asegurar la integridad de recipientes, cañerías u otros componentes metálicos y su aptitud para el servicio requiere, en gran parte, de conocer las propiedades mecánicas de los materiales que los componen. Estas propiedades, como ser la tensión de fluencia o rotura, limitan las condiciones de operación a las que se pueden someter los equipos y, por diversos motivos, no siempre se encuentran disponibles.

Las propiedades mecánicas de un material son habitualmente obtenidas mediante un ensayo de tracción uniaxial (Figura 1), para lo que resulta necesario la elaboración de una probeta del material. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones, los costos de sacar un equipo de servicio, la interrupción de los procesos, el lucro cesante generado y las operaciones que implican sacar una muestra de material para su ensayo en laboratorio y la reparación asociada, suelen ser prohibitivos. Consecuentemente, en la mayoría de los casos, se continúa operando en condiciones restringidas.

Para solucionar éste y otros problemas, se ha desarrollado el ESYS10, un indentador que permite determinar las propiedades mecánicas más relevantes de un material (Tensión de Fluencia, Tensión de Rotura y Coeficiente y Exponente de Endurecimiento por Deformación) mediante la realización de una indentación instrumentada de una bolilla esférica en varios ciclos y registrando simultáneamente carga y desplazamiento. Este ensayo es no destructivo y puede realizarse, generalmente, con el equipo en servicio.

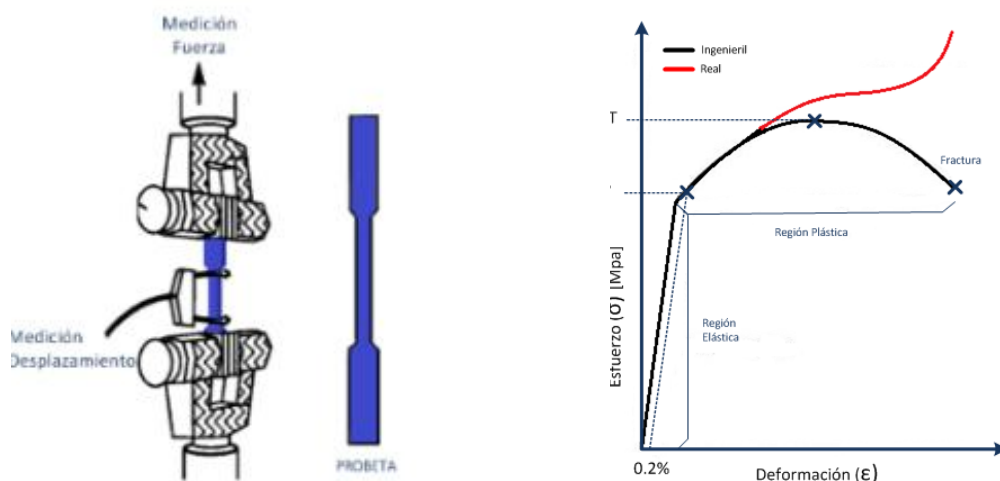


Figura 1. Ensayo de Tracción.

2. DEFINICIONES

- **Ensayo de Tracción:** Consiste en someter una probeta normalizada de un material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

- **Tensión de Fluencia o límite elástico (σ_y):** Es la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. En aceros al carbono se considera como límite elástico la tensión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0.2%.

- **Tensión de Rotura o máxima tensión admisible (σ_{UTS}):** Es la máxima tensión que un material puede soportar al ser traccionado antes de que se produzca la estricción, cuando la sección transversal de la probeta se comienza a contraer de manera significativa.

- **Coefficiente (K) y Exponente (n) de Endurecimiento por Deformación:** En la zona de deformación plástica antes de la estricción la relación tensión – deformación del material puede aproximarse mediante la relación $\sigma = K\epsilon^n$.

3. INDENTADOR INSTRUMENTADO ESYS 10

El indentador, denominado ESYS10, es una máquina de indentación automática portátil. El método consiste en la medición del desplazamiento y fuerza aplicados a medida que se realiza en varios ciclos una impronta en el componente con una punta esférica.

La metodología está basada en los trabajos iniciados por Fahmy Haggag [1], y continuados por varios investigadores.

Existen numerosas publicaciones referentes a la aplicación de esta metodología en industrias como nuclear [2], aeroespacial [3] y principalmente gas & petróleo [4] [5] [6] [7].

3.1. Descripción del Sistema

El equipo está compuesto por la máquina de indentación, una unidad de control y adquisición de datos y un software específicamente desarrollado para el procesamiento en PC.

La máquina de indentación, Figura 2, cuenta con un motor paso a paso y con una caja reductora para permitir un control fino de la velocidad. Esta caja está vinculada mediante un embrague a un tornillo de potencia de bolas recirculantes para evitar juegos. Mediante este último, se convierte el movimiento de giro del motor en un desplazamiento lineal, que permite la introducción de la punta de indentación en el material a ensayar.

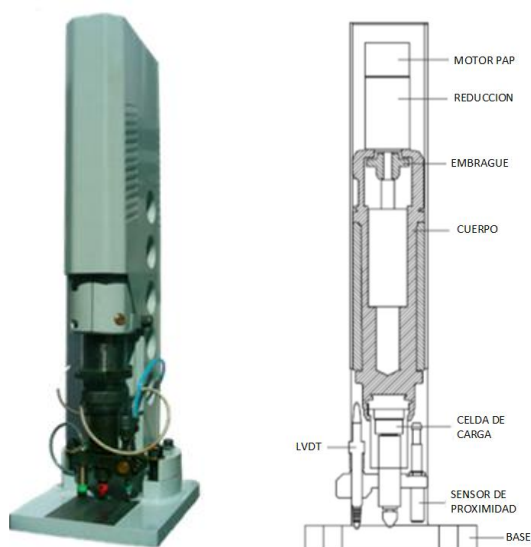


Figura 2. Máquina de Indentación.

La punta de indentación posee una bolilla de carburo tungsteno de 1.57 mm de diámetro, la celda para medición de la carga y el LVDT para la medición del desplazamiento.

La unidad de control y adquisición está basada en una computadora industrial marca National Instruments con placas de control de movimiento y adquisición de datos analógicos. El software del instrumento, Figura 3, se encuentra desarrollado en C# mediante Microsoft Visual Studio.



Figura 3. Software de control.

Las funciones fundamentales de esta unidad son el control del avance del elemento de indentación en función de los parámetros establecidos por el operador, el cual permite realizar el ensayo con distintas velocidades de carga, en distinto número de ciclos y bajo distintas cargas máximas e intermedias. Las lecturas realizadas son almacenadas y luego procesadas para obtener distintos puntos de la curva de tracción, sobre la cual se determinan, finalmente, los parámetros de Tensión de Fluencia, Tensión de Rotura y el Coeficiente de Endurecimiento por Deformación.

3.2. Metodología de Calculo

La metodología está basada en la realización de múltiples Indentaciones mediante una punta esférica en la misma ubicación de una superficie metálica. En la Figura 4 se muestran los perfiles de indentación durante cada carga y cada descarga.

En la Figura 5 se muestra la curva carga-profundidad de la indentación. La carga se incrementa de manera aproximadamente lineal con la profundidad de penetración.

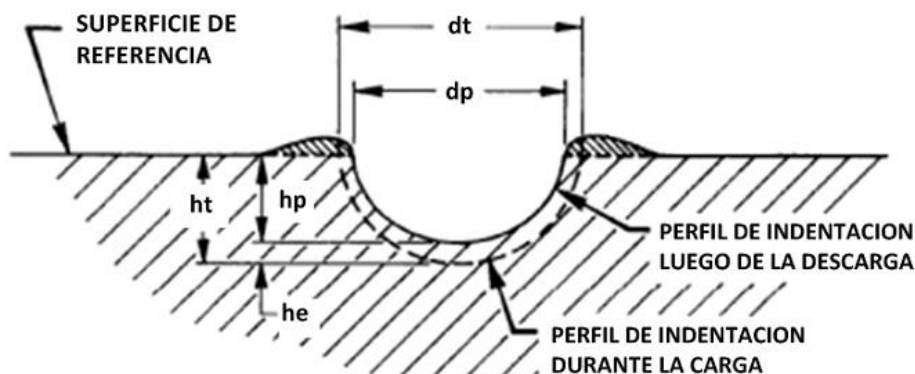


Figura 4. Diámetros y profundidades de indentación.

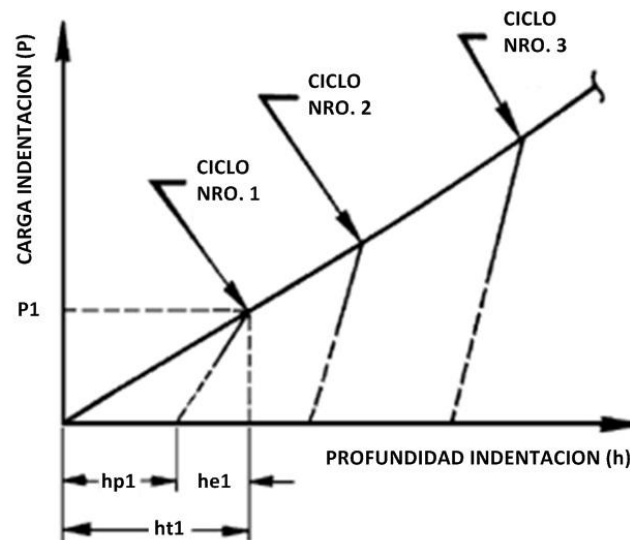


Figura 5. Ciclos de carga-profundidad de la indentación.

A diferencia del ensayo de tracción uniaxial, durante cada ciclo de carga los fenómenos de deformación plástica y elástica se desarrollan simultáneamente.

De este modo para cada ciclo de carga-descarga puede obtenerse un punto de la curva esfuerzo real vs deformación real del material en la región plástica.

- Deformación Real para cada ciclo:

$$\epsilon_p = \frac{0.2 d_p}{D} \quad (1)$$

Donde:

ϵ_p = Deformación Real Plástica

d_p = Diámetro Plástico

D = Diámetro de la bolita (1.57mm)

El diámetro plástico se obtiene resolviendo la siguiente ecuación mediante el método de Newton-Raphson:

$$d_p = \sqrt[3]{2.735 P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) D \frac{h_p^2 + \left(\frac{d_p}{2} \right)^2}{h_p^2 + \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 - h_p D}}$$

Siendo:

$E_1 = 641.22 \text{ GPa}$: *Módulo Young Indentador*

$E_2 = 206.84 \text{ GPa}$: *Módulo Young Material*

h_p = Profundidad de indentación plástica

- Esfuerzo Real para cada ciclo:

$$\sigma_t = \frac{4 P}{\pi d_p^2 \delta} \quad (2)$$

Donde:

σ_t = Esfuerzo Real

P = Carga

δ = Parámetro cuyo valor depende del estado de desarrollo de la zona plástica

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & \emptyset \leq 1 \\ 1.12 + \tau \ln \emptyset & 1 < \emptyset \leq 27 \\ 2.87 \alpha_m & \emptyset > 27 \end{cases}$$

$$\emptyset = \frac{\epsilon_p E_2}{0.43 \sigma_t}$$

$$\tau = \frac{2.87 \alpha_m - 1.12}{\ln(27)}$$

El parámetro α_m debe determinarse experimentalmente a partir de un conjunto de muestras de materiales.

- Tensión de Fluencia σ_y :

Para cada ciclo se obtiene el diámetro total a partir de la profundidad total de indentación como:

$$d_t = 2 \sqrt{h_t D - h_t^2}$$

Este valor de cada ciclo, junto con la carga medida P , es utilizado para obtener por regresión lineal el parámetro A del material y el índice de Meyer m a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{d_t^2} = A \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2}$$

Luego, la tensión de fluencia del material es obtenida como:

$$\sigma_y = \beta_m A + B$$

Los parámetros β_m y B deben determinarse experimentalmente a partir de un conjunto de muestras de materiales.

- Coeficiente y Exponente de endurecimiento por deformación K y n :

El coeficiente y exponente son obtenidos a partir de los valores de deformación real – esfuerzo real obtenidos para cada ciclo de indentación como especifica el método ASTM E646 a partir de la siguiente relación:

$$\sigma_t = K \epsilon_p^n$$

- Tensión de Rotura σ_{UTS} :

Se obtiene como:

$$\sigma_{UTS} = K \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

4. VALIDACIÓN EN TUBERÍAS

Para la validación del método en tuberías API, se compararon los resultados obtenidos mediante la determinación de propiedades mecánicas con ESYS10 con los obtenidos mediante el ensayo clásico de tracción uniaxial, a partir de cuatro muestras.

4.1 Muestras de Materiales

Se utilizaron para esta validación cuatro muestras de tuberías de distintos diámetros y espesores,

MUESTRA	DIÁMETRO	ESPESOR
Nº 1	6''	5.45 mm
Nº 2	10''	9.60 mm
Nº 3	12''	6.82 mm
Nº 4	16''	6.65 mm

Tabla 1, mostradas en la Figura 6 a Figura 9.

MUESTRA	DIÁMETRO	ESPESOR
Nº 1	6''	5.45 mm
Nº 2	10''	9.60 mm
Nº 3	12''	6.82 mm
Nº 4	16''	6.65 mm

Tabla 1. Muestras ensayadas.



Figura 6. Muestra N°1



Figura 7. Muestra N°2



Figura 8. Muestra N°3

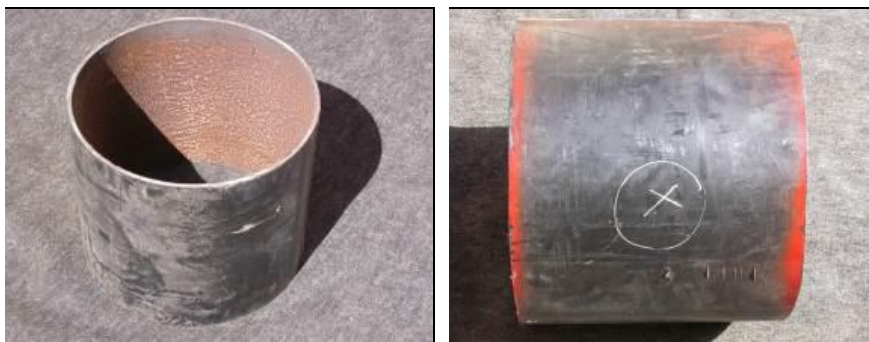


Figura 9. Muestra N°4

4.2 Ensayos de Tracción Uniaxial

Sobre cada una de las cuatro muestras de tuberías se mecanizaron tres probetas, que fueron luego ensayadas de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM E8. Los ensayos de Tracción Uniaxial fueron realizados en los laboratorios LABTESA S.A de Ciudadela, Pcia. De Buenos Aires.

Los valores obtenidos de Tensión de Fluencia y Tensión de Rotura de cada una de las muestras se presentan en la

ENSAYOS TRACCIÓN (LABTESA)		σ_{ys} [MPa]	σ_{ys} Prom. [MPa]	σ_{ys} Desv. [%]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{UTS} Prom. [MPa]	σ_{UTS} Desv. [%]
Muestra 1	Probeta 1	350.00	357.67	2.14%	434.00	430.33	0.85%
	Probeta 2	364.00		1.77%	427.00		0.77%
	Probeta 3	359.00		0.37%	430.00		0.08%
Muestra 2	Probeta 1	465.00	471.00	1.27%	549.00	549.33	0.06%
	Probeta 2	479.00		1.70%	553.00		0.67%
	Probeta 3	469.00		0.42%	546.00		0.61%
Muestra 3	Probeta 1	439.00	440.33	0.30%	525.00	527.67	0.51%
	Probeta 2	430.00		2.35%	524.00		0.69%
	Probeta 3	452.00		2.65%	534.00		1.20%
Muestra 4	Probeta 1	529.00	527.67	0.25%	645.00	647.00	0.31%
	Probeta 2	529.00		0.25%	648.00		0.15%
	Probeta 3	525.00		0.51%	648.00		0.15%

Tabla 2. En el Anexo 1 del presente documento se muestran los registros de los ensayos realizados.

ENSAYOS TRACCIÓN (LABTESA)		σ_{ys} [MPa]	σ_{ys} Prom. [MPa]	σ_{ys} Desv. [%]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{UTS} Prom. [MPa]	σ_{UTS} Desv. [%]
Muestra 1	Probeta 1	350.00	357.67	2.14%	434.00	430.33	0.85%
	Probeta 2	364.00		1.77%	427.00		0.77%
	Probeta 3	359.00		0.37%	430.00		0.08%
Muestra 2	Probeta 1	465.00	471.00	1.27%	549.00	549.33	0.06%
	Probeta 2	479.00		1.70%	553.00		0.67%
	Probeta 3	469.00		0.42%	546.00		0.61%
Muestra 3	Probeta 1	439.00	440.33	0.30%	525.00	527.67	0.51%
	Probeta 2	430.00		2.35%	524.00		0.69%
	Probeta 3	452.00		2.65%	534.00		1.20%
Muestra 4	Probeta 1	529.00	527.67	0.25%	645.00	647.00	0.31%
	Probeta 2	529.00		0.25%	648.00		0.15%
	Probeta 3	525.00		0.51%	648.00		0.15%

Tabla 2. Resultados Ensayos Tracción Uniaxial.

4.3 ENSAYOS MEDIANTE ESYS10

Sobre una probeta obtenida de cada muestra, se realizaron tres ensayos con el indentador ESYS 10, Figura 10. Previo a la realización de las mediciones, las superficies de cada tubería se pulieron efectuando desbastes sucesivos desde lija grano 40 hasta grano 600.

Los valores obtenidos de Tensión de Fluencia y Tensión de Rotura mediante el ensayo ESYS con los parámetros ajustados se presentan en la

ENSAYOS ESYS10		σ_{YS} [MPa]	σ_{YS} Prom. [MPa]	σ_{YS} Desv. [%]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{UTS} Prom. [MPa]	σ_{UTS} Desv. [%]
Muestra 1	Indentación 1	368.51	365.97	0.69%	451.30	446.05	1.18%
	Indentación 2	365.71		0.07%	441.77		0.96%
	Indentación 3	363.69		0.62%	445.07		0.22%
Muestra 2	Indentación 1	470.23	469.35	0.19%	552.32	540.33	2.22%
	Indentación 2	462.33		1.49%	528.08		2.27%
	Indentación 3	475.48		1.31%	540.60		0.05%
Muestra 3	Indentación 1	408.80	427.61	4.40%	491.44	513.22	4.24%
	Indentación 2	434.94		1.71%	523.52		2.01%
	Indentación 3	439.09		2.68%	524.71		2.24%
Muestra 4	Indentación 1	529.62	532.87	0.61%	628.40	624.82	0.57%
	Indentación 2	545.23		2.32%	625.55		0.12%
	Indentación 3	523.76		1.71%	620.51		0.69%

Tabla 3.



Figura 10. Indentador ensayando las muestras.

ENSAYOS ESYS10		σ_{ys} [MPa]	σ_{ys} Prom. [MPa]	σ_{ys} Desv. [%]	σ_{UTS} [MPa]	σ_{UTS} Prom. [MPa]	σ_{UTS} Desv. [%]
Muestra 1	Indentación 1	368.51	365.97	0.69%	451.30	446.05	1.18%
	Indentación 2	365.71		0.07%	441.77		0.96%
	Indentación 3	363.69		0.62%	445.07		0.22%
Muestra 2	Indentación 1	470.23	469.35	0.19%	552.32	540.33	2.22%
	Indentación 2	462.33		1.49%	528.08		2.27%
	Indentación 3	475.48		1.31%	540.60		0.05%
Muestra 3	Indentación 1	408.80	427.61	4.40%	491.44	513.22	4.24%
	Indentación 2	434.94		1.71%	523.52		2.01%
	Indentación 3	439.09		2.68%	524.71		2.24%
Muestra 4	Indentación 1	529.62	532.87	0.61%	628.40	624.82	0.57%
	Indentación 2	545.23		2.32%	625.55		0.12%
	Indentación 3	523.76		1.71%	620.51		0.69%

Tabla 3. Resultados Ensayos ESYS 10.

4.4 Comparación de Resultados

En la

	TENSION DE FLUENCIA [MPa]			TENSION DE ROTURA [MPa]		
	ESYS10	Tracción	Error	ESYS10	Tracción	Error
Muestra 1	365.97	357.67	2.32%	446.05	430.33	3.65%
Muestra 2	469.35	471.00	-0.35%	540.33	549.33	-1.64%
Muestra 3	427.61	440.33	-2.89%	513.22	527.67	-2.74%
Muestra 4	532.87	527.67	0.99%	624.82	647.00	-3.43%

Tabla 4 se muestra la comparación de los resultados entre ambos ensayos y el error obtenido.

	TENSION DE FLUENCIA [MPa]			TENSION DE ROTURA [MPa]		
	ESYS10	Tracción	Error	ESYS10	Tracción	Error
Muestra 1	365.97	357.67	2.32%	446.05	430.33	3.65%
Muestra 2	469.35	471.00	-0.35%	540.33	549.33	-1.64%
Muestra 3	427.61	440.33	-2.89%	513.22	527.67	-2.74%

Muestra 4	532.87	527.67	0.99%	624.82	647.00	-3.43%
------------------	--------	--------	--------------	--------	--------	---------------

Tabla 4. Comparación de resultados.

Todos los resultados de los ensayos, tanto de ESYS10 como de Tracción Uniaxial, mostraron muy baja dispersión.

- Se observa un error aceptable en la estimación de la tensión de fluencia mediante ESYS10. En todos los casos, el error es menor al límite del 10%, siendo el máximo de -2.89%.
- Se observa un error aceptable en la estimación de la tensión de rotura mediante ESYS10. En todos los casos, el error es menor al límite del 10%, siendo el máximo de 3.65%.

5. APLICACIONES

Gie SA ha llevado a cabo proyectos de determinación de propiedades mecánicas de materiales utilizando la tecnología descrita para reconocidas empresas del sector de gas & petróleo de Argentina y Perú. A continuación, se describen brevemente algunos de estos trabajos realizados.

5.1 Determinación de Propiedades Mecánicas de Ducto en Servicio

Se realizaron indentaciones en 7 ubicaciones de un gasoducto de 24'' en la zona norte del Gran Buenos Aires.



Figura 11. Indentación en gasoducto 24''.

Los resultados obtenidos se muestran en la

UBICACIÓN	3211	3214	3216	3217	3218	3219	Probeta (Tracción)
I_{YS} [MPa]	403	380	423	391	428	401	384
I_{UTS} [MPa]	593	546	602	628	557	551	575

Tabla 5 y fueron contrastados contra un ensayo de tracción realizado por la empresa cliente a partir de una muestra del material del ducto. Nuevamente, se puede apreciar una diferencia reducida y aceptable entre el ensayo de tracción normalizado y el ensayo en servicio mediante el ESYS

UBICACIÓN	3211	3214	3216	3217	3218	3219	Probeta (Tracción)
σ_{YS} [MPa]	403	380	423	391	428	401	384
σ_{UTS} [MPa]	593	546	602	628	557	551	575

Tabla 5. Resultados obtenidos.

La batería de ensayos mediante ESYS, permitió re clasificar el material del ducto, previamente desconocido, como de grado API 5L X52. Esta re clasificación, permite aprovechar completamente las capacidades del gasoducto, cambiando así la MAPO del tramo.

5.2 Determinación de Propiedades Mecánicas de Flow Line 6''

Se requirió la determinación de las propiedades mecánicas en tramos reparados no documentados de una Flow Line de 6'' ubicada en la zona norte del Perú con objeto de verificar que los mismos satisficían los requerimientos mínimos de un acero API 5L X42.

Se realizaron 39 determinaciones en distintas ubicaciones de la traza de 32 Km de la línea. Los resultados de los ensayos realizados se muestran en la Figura 13.

La campaña permitió así re clasificar los tramos reparados no documentados que habían sido conservativamente clasificados como Grado B.



Figura 12. Indentaciones en Flow Line de 6'', Amazonas Peruano

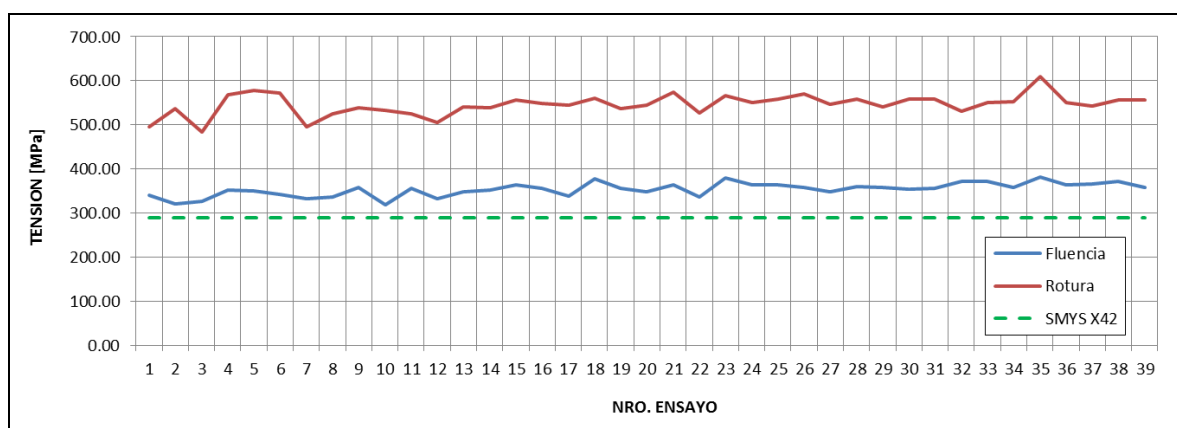


Figura 13. Resultados indentaciones en Flow Line de 6''.

5.3 Determinación de Propiedades Mecánicas en Tuberías, Equipos y Tanques

Se requirió la determinación de las propiedades mecánicas en ciertos equipos, tuberías y tanques pertenecientes a un complejo de procesamiento de gas natural ubicado en Bahía Blanca. Los años en servicio de la instalación, y la gestión en la época de Gas del Estado, derivaron en la falta de registros de una buena cantidad de los activos. El actual operador llevo adelante una campaña de reclasificación de materiales, donde reconstruyeron la documentación de los equipos en cuestión.

En la

ID	Fluencia σ_{YS} [MPa]	Rotura σ_{UTS} [MPa]
Separador Gas Natural - PV17.22.	407.32	556.33
Colector Salida de MC Clark.	397.89	544.80
Colector Salida de Fanes PC Fiat.	383.37	555.81
Tramo aguas abajo de la Válvula v54.	420.86	566.45
Separador N° 2 (descarga de planta).	369.58	489.23
Colector descarga de cilindros MC3.	432.76	611.01
TK2 tanque de agua desmineralizada.	235.30	416.97
Aireador caldera Loos.	198.47	492.67

Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos. La estimación de los materiales de cada equipo ensayo fue contrastada con la estimación de materiales que realizó paralelamente la empresa Invap a partir de la determinación de las propiedades químicas mediante el ensayo de espectrometría de chispa arribando a los mismos resultados.



Figura 14. Indentaciones en equipos y tanque.

ID	Fluencia σ_{YS} [MPa]	Rotura σ_{UTS} [MPa]
Separador Gas Natural - PV17.22.	407.32	556.33
Colector Salida de MC Clark.	397.89	544.80
Colector Salida de Fanes PC Fiat.	383.37	555.81
Tramo aguas abajo de la Válvula v54.	420.86	566.45
Separador N° 2 (descarga de planta).	369.58	489.23
Colector descarga de cilindros MC3.	432.76	611.01
TK2 tanque de agua desmineralizada.	235.30	416.97
Aireador caldera Loos.	198.47	492.67

Tabla 6. Resultados obtenidos en equipos y tuberías.

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó la tecnología de indentación instrumentada automática como alternativa confiable al tradicional ensayo de tracción para la determinación de propiedades mecánicas de materiales cuando los costos de sacar de servicio los equipos, la interrupción de los procesos, el lucro cesante generado y las operaciones que implican sacar una muestra de material para su ensayo en laboratorio hacen la realización de este último inviable.

En el proceso de validación para diferentes tuberías de acero al carbono se observó un error aceptable en la estimación de sus propiedades mecánicas, en todos los casos, menor al límite del 10%.

El equipo se utilizó exitosamente en diversas instalaciones, flowlines en la región selvática, ductos de gas y petróleo en Argentina, tanques, probando no solo la flexibilidad del equipo, sino también la confiabilidad de los resultados.

En todos los casos, la identificación del material permitió al operador re clasificar los componentes, optimizando las variables productivas.

7. REFERENCIAS

- [1] F.M. Haggag and K.L. Murty, "A Novel Stress-Strain Microprobe for Nondestructive Evaluation of Mechanical Properties of Materials," Nondestructive Evaluation (NDE) and Materials Properties III, ed. P.K. Liaw et al. (Warrendale, PA: TMS, 1997), pp. 101-106.
- [2] "Effects of Irradiation Temperature on Embrittlement of Nuclear Pressure Vessel Steels," Effects of Radiation on Materials: 16th International Symposium, ASTM STP 1175, A. S. Kumar, D. S. Gelles, R. K. Nanstad, and E. A. Little, Eds., Philadelphia, 1993, pp. 172-185.

- [3] "Nondestructive Detection and Assessment of Damage in Aging Aircraft Using a Novel Stress-Strain Microprobe System," SPIE Proceedings on "Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware," Vol. 2945, 1996, pp. 217-228.
- [4] "In-Situ Measurement of Pipeline Mechanical Properties Using Stress-Strain Microprobe - Validation of Data for Increased Confidence & Accuracy," Pipeline Research Council International (PRCI), Report L52280e, Apr. 1, 2007.
- [5] "In-Situ Measurement of Tensile and Fracture Toughness Properties and Determination of Pipe Grade Using the Innovative ABI Test," Gas Technology Institute Project 20568, Final Report, November 2008.
- [6] "In-Situ Measurement of Tensile and Fracture Toughness Properties of Pipeline Sections Using the Innovative ABI Test of ATC's SSM System," Gas Technology Institute Project 20568, Addendum, February 2009.
- [7] "In-Situ ABI Testing to Determine Yield Strength, Pipe Grade, and Fracture Toughness of In-Service Oil and Gas Pipelines," Russian Oil and Gas