

## Desarrollo nacional para la caracterización mecánica no destructiva de componentes metálicos en servicio

J.L. Otegui<sup>1,2</sup>, H. Kunert<sup>2,3</sup>, J. Booman<sup>3</sup>, P. Morgenstern<sup>3</sup>, A. Marquez<sup>2</sup>

### Afiliación

<sup>1</sup> Conicet, Intema. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería.

<sup>3</sup> Gie S.A., Integridad de Instalaciones, Galicia 52, Mar del Plata (7600), Buenos Aires, Argentina, Te: 0223 482-2308, booman@giemdp.com.ar

### Resumen

Se describe el modelado, construcción y calibración de un equipo Indentador que permite determinar las propiedades mecánicas en materiales metálicos, desarrollado en colaboración entre una institución académica y una empresa de servicios de ingeniería, con el apoyo de un subsidio del Estado Argentino (FONTAR – ANR). El resultado es una máquina de indentación portátil, que permite determinar propiedades mecánicas en forma no destructiva, sin extracción de muestras.

El método consiste en la medición del desplazamiento y fuerza realizados a medida que se realiza una impronta en el componente del cual se desea determinar el material. Se basa en los trabajos iniciados por Fahmy Haggag et al <sup>(1)</sup>, y continuados por varios investigadores <sup>(2)</sup>. El equipo está compuesto por la máquina que realiza el ensayo, una unidad de control y adquisición de datos y un software específicamente desarrollado para el procesamiento en PC. Las funciones fundamentales del aparato medidor son el control del avance del elemento de indentación en función de los parámetros establecidos por el operador, el tratamiento de las lecturas realizadas y el almacenamiento de las tensiones y desplazamientos.

Lo realmente novedoso es el sistema de adquisición de datos, que asegura la estabilidad y repetitividad de la medición, y el software desarrollado, que entrega valores de resistencia a la fluencia y rotura, y ductilidad. El equipo ha superado la etapa de ensayos de calibración, contrastación con ensayos destructivos y análisis estadístico de los resultados, mostrando una adecuada repetitividad y confiabilidad.

### 1. Introducción

Asegurar la integridad de los recipientes depende en gran parte de conocer las propiedades reales de los materiales que los componen. En muchos casos, el traspaso de los activos de una firma a otra o cuestiones de procesos administrativos incompletos o erróneos han llevado a que los operadores desconozcan el material de los equipos a su cargo. Esto los obliga a realizar suposiciones, normalmente conservativas, que incrementan los costos de operación.

En la mayoría de las ocasiones, 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 ensayo en laboratorio, suelen ser mayores que continuar operando dentro de los parámetros de seguridad a bajas presiones.

Existen diversos tipos de ensayos no destructivos ampliamente utilizados, ampliamente utilizados, que permiten evaluar la integridad de un equipo, caracterizar un material químicamente, o determinar su dureza, pero ninguno de estos ensayos permite conocer la tensión de Fluencia.

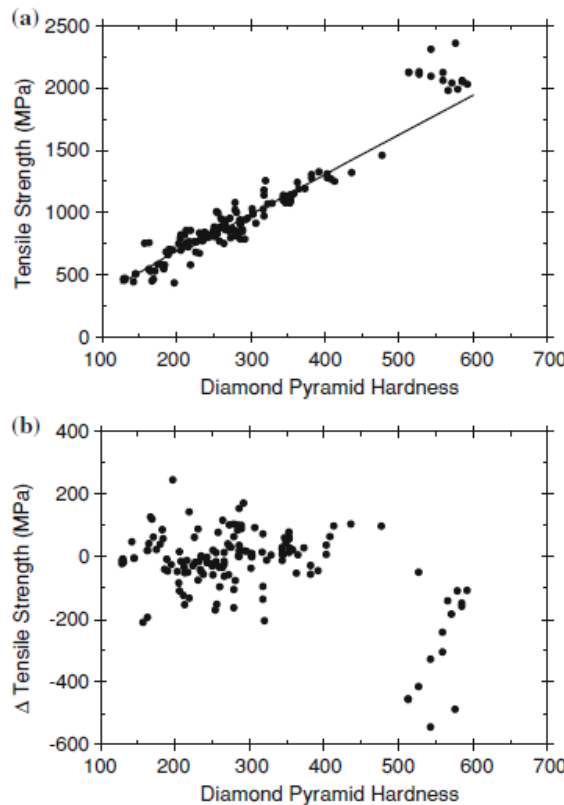
### 1.1 Correlación Dureza-Tensión de Rotura

Según distintas fuentes bibliográficas<sup>(3,4)</sup>, las relaciones entre la resistencia última mínima ( $S_{ut}$ ) y el índice de dureza Brinell para los aceros es:

$$S_{ut} = 0.45 * HB \text{ (kpsi)} = 3.10 * HB \text{ (Mpa)} \dots\dots\dots(1)$$

Pavlina et al<sup>(5)</sup> reprodujeron la relación

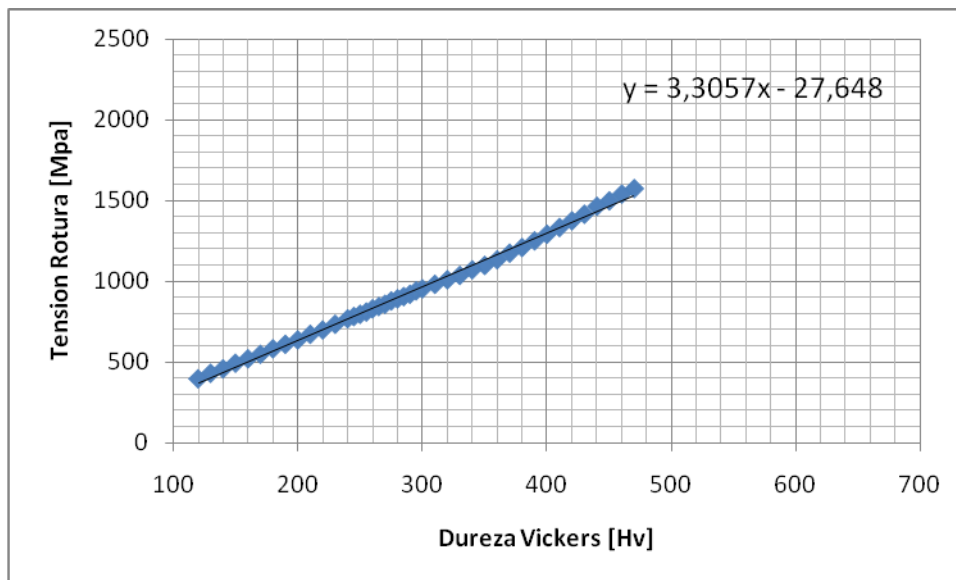
$$S_{ut} = 3.45 * HB \dots\dots\dots(2)$$



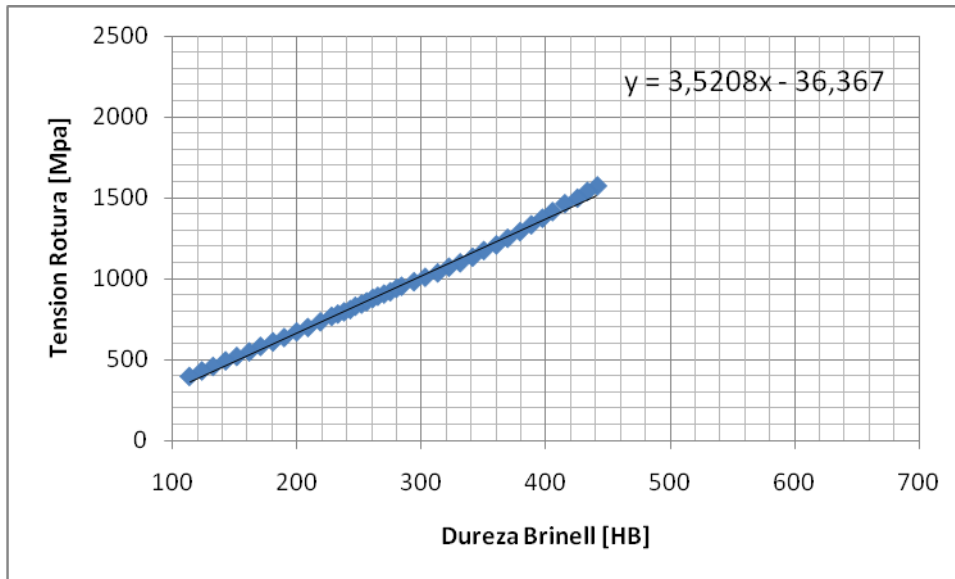
**Figura 1 (a) Tensión de rotura real y estimada, en función de la dureza. (b) Diferencia entre la tensión de rotura predicha a partir de la ecuación 1 y la tensión de rotura verdadera.**

y en base a la recopilación de datos de diferentes trabajos presentan la concordancia entre la recta y los datos experimentales, Figura 1.a. La Figura 1.b muestra la diferencia entre los valores de  $S_{ut}$  extraídos de la curva matemática y los valores de  $S_{ut}$  extraídos de datos reales. Pavila concluye que para valores de dureza altos (mayor a 450 DPH o 425 HB) la ecuación 2 pierde linealidad y sub estima los valores de  $S_{ut}$  reales. También se observa en la Fig. 1.b que la dispersión de valores entre sus datos y la ecuación son del orden de  $\pm 100$  Mpa. Esta desviación en los resultados no es importante para grandes valores, pero para materiales con una  $S_{ut}$ , por ejemplo, de 450 Mpa, representa un error del 22%.

La norma API 579-1 anexo F presenta una tabla que da una equivalencia aproximada entre la dureza y la  $S_{ut}$  para aceros al carbono y baja aleación en las condiciones de recocido, normalizado, templado y revenido <sup>(6)</sup>. En la norma no se encuentran referencias de donde fueron sacados estos datos ni la dispersión con que fue construida la tabla. La Figura 2.a, muestra la serie de puntos que aparecen en la tabla y la ecuación que gobierna esos puntos (Rotura vs Vickers). La Figura 2.b muestra los mismos datos pero en escala Brinell (Rotura vs HB). La pendiente de la recta coincide con la que aparece en la literatura (ec. 1 y 2) y la evaluada por Pavlina. Pero como se observa en la Figura 1, a altos y bajos valores de dureza (150 HB/3000kgf) y tensión, la relación no es lineal<sup>(3)</sup>, los datos son muy dispersos y las correlaciones lineales encontradas no se ajustan adecuadamente. Aunque para valores entre 150 – 550 HB o y 450 – 2350 MPa( $S_{ut}$ ), la relación es bastante lineal, los aceros usados en recipientes y gasoductos generalmente no entran en este grupo ya que generalmente presentan tensiones de fluencia y rotura menores. Es decir que, si bien existe una relación entre dureza y tensión rotura, la estimación de esta relación presenta grandes márgenes de error y variabilidad.



**Figura 2.a. Tensión de rotura vs dureza Vickers**



**Figura 2.b: Tensión de rotura vs dureza Brinell**

## 2. Teoría de funcionamiento del Indentador Instrumentado

### 2.1. Relación con el ensayo de dureza

El ensayo de dureza consiste en la introducción de una punta indentadora, de un material cuya dureza es mucho mayor que la del material a ensayar y de geometría conocida, mientras se registra el máximo esfuerzo realizado y el diámetro de la impronta resultante. El resultado del ensayo es un valor que representa la relación entre la deformación remanente que deja determinada carga.

En función del tipo de indentador, varía el estado tensional en la punta del indentador. Para el caso de dureza Brinell, en el que el indentador es esférico, es posible determinar un valor de Presión media ( $P_m$ ). La presión media se relaciona con la tensión por Tabor et- Al según <sup>(7)</sup>

$$\sigma = \left(\frac{1}{\Psi}\right)P_m = \left(\frac{1}{\Psi}\right)\left(\frac{P}{\pi a_c^2}\right) \dots\dots\dots(3)$$

donde  $\Psi$ : plastic constraint factor; P: Load;  $a_c$ : Contact Radius

Esta ecuación junto con la ecuación 4, permiten transformar estar presión media y la profundidad de la impronta en valores de tensión y deformación equivalentes a un estado de tensión uniaxial, como en el caso de un ensayo de tracción <sup>(8,9)</sup>.

$$\varepsilon = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-(a_c/R)^2}}\right)\left(\frac{a_c}{R}\right) \dots\dots\dots(4)$$

$a_c$ : Contact Radius; R: indenter radius,  $\alpha=0,14$

K. L. Murty et al. realizaron un estudio dimensional para obtener una ecuación que relacionara la variación de la dureza en función del avance del indentador esférico, basándose en el Teorema de Pi, de Vaschy-Buckingham<sup>(10)</sup>. Esta ecuación es función del coeficiente de endurecimiento por deformación ( $n$ ), la tensión de fluencia ( $\sigma_y$ ) y el módulo de elasticidad lineal ( $E$ ).

Como se dijo, inferir la tensión de rotura a partir de un ensayo de dureza (o de varios ensayos de dureza normalizados bajo la misma carga) no es confiable, pero realizar varias indentaciones y registrar las deformaciones remanentes bajo distintas cargas sí permite determinar distintos puntos de la curva de tracción. Con al menos tres puntos de la curva e incorporando conceptos de elasticidad lineal, es posible encontrar la curva que mejor ajusta a dichos puntos y que es, precisamente, la curva de tracción del material, de la cual se calculan la Tensión de Fluencia, la Tensión de Rotura y el coeficiente de endurecimiento por deformación.

## **2.2: Revisión Histórica/ Antecedentes**

Fammy Haggag propuso <sup>(11)</sup> concentrar todos los ensayos en un solo proceso de indentación formado por varios ciclos de carga y descarga, con cargas máximas progresivas.

Al realizar un ensayo con varios ciclos de descarga, se puede inferir la profundidad de la impronta que dejaría cada ciclo y se obtienen así varios valores con un sólo ensayo.

Haggag validó las ecuaciones propuestas comparando las características mecánicas de un cordón soldado<sup>(12)</sup>, diversos puntos del metal base, la zona afectada por el calor (ZAC) y el material de aporte, con ensayos de tracción realizados a las mismas probetas.

Yamamoto ey Al. <sup>(13)</sup> realizaron un estudio aplicando el sistema de cálculo mencionado anteriormente, confirmando así el método y mostrando una buena correlación al compararlo con ensayos de tracción.

## **3. ESYS 10**

Se realizó un diseño integral de una máquina para la aplicación en campo de la técnica. En el prototipo resultante, la medición del desplazamiento se realiza mediante un sensor analógico inductivo (LVDT) mientras el registro de la fuerza se realiza mediante una celda de carga, conectada en serie con la punta esférica de carburo de tungsteno, de diámetro conocido (1,5 mm).

El equipo de indentación 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.

Se prestó especial cuidado en el aspecto estructural de la máquina por el hecho de la generación de tensiones excesivas por la naturaleza propia del ensayo, para lo cual se

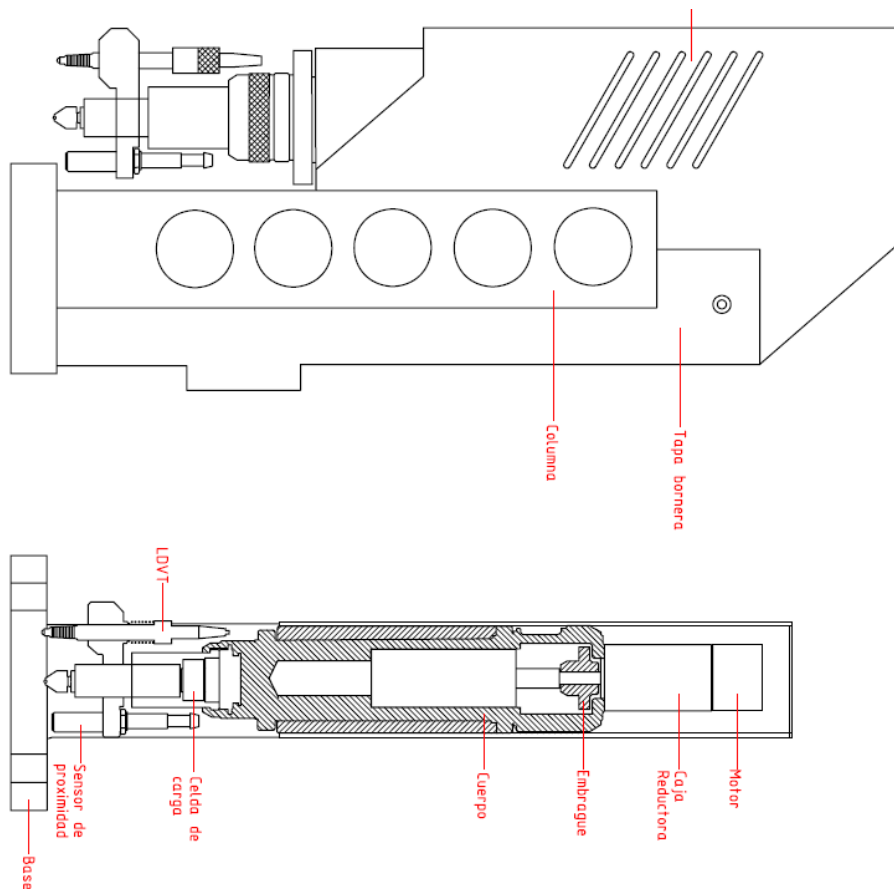
agregó un sensor de proximidad, dos sensores de fin de carrera y un sensor de posición de inicio (o “home”), todos digitales.

También se diseñó la unidad de control y adquisición de datos y la unidad de procesamiento de los datos extraídos, la cual incluye un software especialmente desarrollado por Gie S.A. Las funciones fundamentales de estas unidades 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 los puntos de la curva de tracción, sobre la cual se determinan finalmente los parámetros de Tensión de Fluencia, Tensión de Rotura y Coeficiente de Endurecimiento por Deformación.

Se diseñó además un sistema de adquisición de datos que asegura la estabilidad de la medición, así como su repetitividad. La sección electrónica de control y adquisición está constituida por una computadora, una placa de adquisición de las señales y control de motores, un módulo para acondicionamiento de las señales y los mencionados sensores de fuerza y desplazamiento.

Las señales provistas por los sensores analógicos son acondicionadas para poder ser interpretadas por el equipo de adquisición, para ello se introdujo un módulo intermedio entre los sensores y la placa de adquisición.

La Figura 4 muestra los aspectos más salientes del diseño y construcción del indentador. La Figura 5 muestra los dos módulos del equipo, en su versión operativa para trabajo en campo.



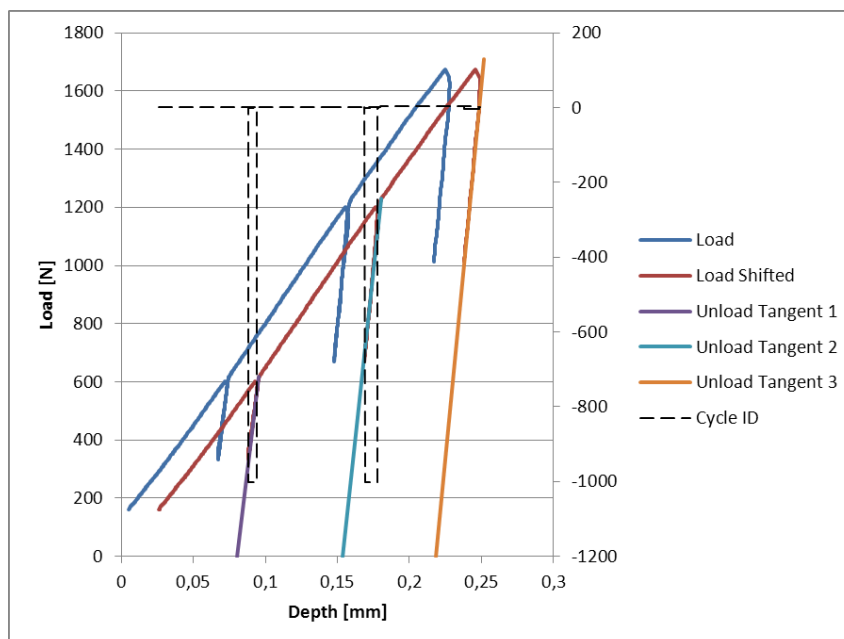
**Figura 4: Plano descriptivo del indentador**



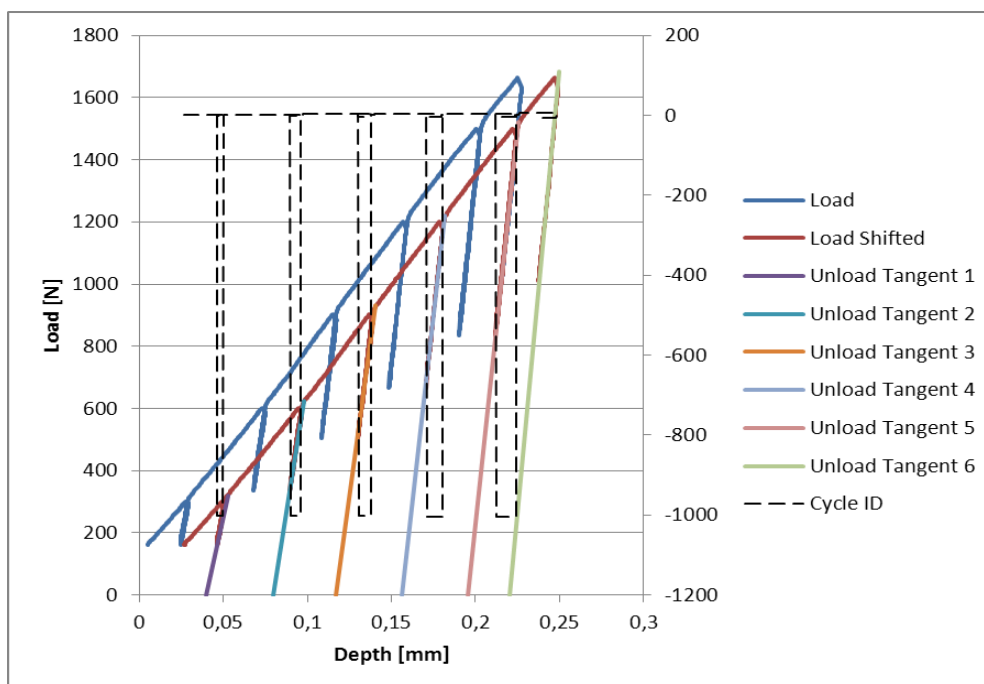
**Figura 5: Equipo de Ensayo – ESYS 10. Indentador (izquierda) y conjunto adquirente y controlador (derecha)**

#### 4. Resultados de Ensayos de Validación

En las Figuras 6 y 7 se muestran, como ejemplo, las curvas carga – profundidad de la impronta, obtenidas en ensayos en campo sobre tubería API, de 3 y 6 ciclos, respectivamente. En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos en cada ensayo y los valores promedio.



**Figura 6: Curva carga-profundidad de la impronta, 3 ciclos.**



**Figura 7: Curva carga-profundidad de la impronta, 5 ciclos.**

**Tabla 1. Resultados obtenidos en cada ensayo y los valores promedio.**

	3 ciclos	6 ciclos	promedio	Unidades
Tensión de Fluencia	323,2	315,0	319,1	MPa
Tensión de Rotura 1	441,8	438,7	441,6	MPa
Tensión de Rotura 2	444,4	441,6		MPa
Coef. de Endur. x Def.	0,11	0,11	0,11	-

Para verificar la precisión del equipo cuando es usado en distintos materiales y en distintas condiciones de soportación, se están realizando ensayos sobre distintos tipos de aceros y con distintas geometrías de piezas. El procedimiento de validación incluye la ejecución de varias indentaciones sobre cada muestra, los resultados se promedian y se calculan las desviaciones estándar respectivas.

La Tabla 2 reúne los resultados de ensayos de tracción y dureza realizados en Intema (UNMdP, CONICET) y en la UNS y tomados como referencia para los análisis. La Tabla 3 presenta los resultados de los ensayos de dureza realizados sobre las probetas. El equipamiento usado fue un durómetro de campo DHT-100. Se realizaron 15 mediciones de dureza sobre cada probeta dado que el instrumento presenta gran variabilidad. De todos estos valores, se calculó la media aritmética y la desviación estándar para cada probeta.

Finalmente, la Tabla 4 muestra los resultados obtenidos con el Indentador ESYS 10. Se detallan los valores de tensión de fluencia y de tensión de rotura. Dado que para cada muestra se realizaron tres indentaciones (excepto para la muestra 8, en la que se realizaron dos), se indica también la desviación estándar de los muestreos.

La Figura 8 muestra tres series de puntos: la verde corresponde a la correlación entregada por la norma API 579 Ap. F, la roja a los puntos de la tensión de rotura usada como patrón vs la dureza medida; y la azul, la serie de puntos tensión de rotura entregada por el ESYS 10. Como se ve en el gráfico, para un cierto rango de valores de dureza (150-190 HB) la tensión de rotura se sobre-estima si se usa la correlación entregada por la norma API 579.

**Tabla 2: ensayos recopilados de distintos proyectos de Gie**

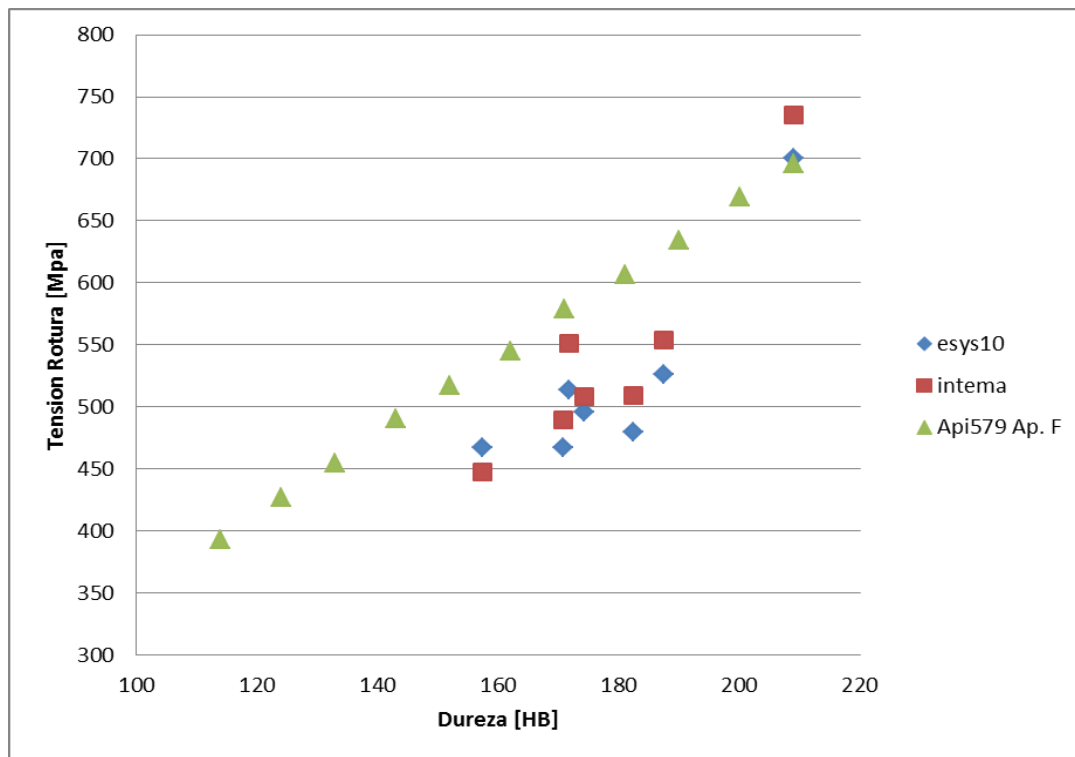
INTEMA				
N° Muestra	material	Dureza [HB]	fluencia [Mpa]	rotura1 [Mpa]
1	api 5l x46	-	-	447
2	api 5l x46	146	316	489
3	api 5l x52	184	-	551
4	api 5l x52	-	402	508
5	api 5l x52	-	367	509
6	api 5l x52	184	-	554
7	api 5l x70	-	480	735
	ASTM A106 Gr. B	-	306,8	465,9

**Tabla 3: resultados de dureza sobre las probetas ensayadas con el esys10**

Dureza equotip		
N° Muestra	Dureza [HB]	desv dure [HB]
1	157,3	6,6
2	170,7	13,5
3	171,8	2,2
4	174,2	1,7
5	182,5	4,7
6	187,4	2,8
7	209	1,05

**Tabla 4: resultados obtenidos con el esys10**

ESYS10										
	Fluencia [Mpa]	Desv. fluencia [Mpa]	% fluencia desviación	Error Fluencia [Mpa]	% error Fluencia	Rotura1 [Mpa]	desv rotura [Mpa]	% rotura desviación	Error Rotura [Mpa]	% error rotura
1	327,3	1,4	0,43	-	-	467	4,8	1,03	+20	+4,47
2	320,6	8,9	2,78	+4,6	1,46	467	13,9	2,98	-22	-4,50
3	359,6	6,5	1,81	-	-	514	11,7	2,28	-37	-6,72
4	349,4	15,2	4,35	-56,6	-13,08	495,3	12,5	2,52	-12,7	-2,50
5	342,8	7,3	2,13	-24,2	-6,59	479,4	16,9	3,53	-29,6	-5,82
6	366,2	1,6	0,44	-	-	526,4	3,4	0,65	-27,6	-4,98
7	498	18	3,61	+18	+3,75	700	35	5,00	-35	-4,76
8	319,1	4,1	1,28	+12,3	+7,60	441,6	2,8	0,63	24,3	+5,5



**Figura 8. Correlaciones Tensión de rotura vs Dureza**

## 5. Conclusiones

La precisión del instrumento para determinar la Tensiones de Fluencia es aceptable ya que presenta una dispersión de aproximadamente 15 Mpa, esto es, una dispersión menor al 5 % del valor medio entregado por el instrumento. En cuanto a la Tensión de Rotura, la dispersión de los valores aumenta a 35 Mpa, es decir, un 5% de dispersión en los valores medidos.

El instrumento presenta errores aleatorios. Es decir, los ensayos arrojaron valores que están en exceso o en defecto del valor tomado como verdadero. El máximo error por

defecto en la estimación de la tensión de Fluencia es de 56,6 Mpa en defecto y de 18 Mpa en exceso, esto representa un 13% y 7,6% respectivamente. En cuanto a la exactitud en la estimación de la tensión de rotura los márgenes de error disminuyen considerablemente, llegando como máximo 37 Mpa en defecto y 20 Mpa en exceso, esto representa un 6,7% y 4,5% respectivamente.

La representación gráfica de la relación entre tensión de rotura y dureza muestra que si se considera la correlación de la norma API 579 se está sobre-estimando el valor de tensión de rotura del material.

La estimación de los valores de tensión de rotura por medio de las correlaciones habituales (literatura o normas), puede llegar a dar un valor por demás en exceso del valor real. Esto puede volverse crítico en algunas situaciones.

El uso de indentadores instrumentados como el ESYS 10 representa una ventaja sustancial respecto de las técnicas habituales puesto que disminuye el error en la determinación de la Tensión de Rotura y permite estimar la Tensión de Fluencia, entre otros parámetros.

## 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. F. Haggag, Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials". *Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing*, ASTM 1092, A. A. Braun, N. E. Ashbaugh, and F. M. Smith, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 188-208. (1990)
3. *Diseño en ingeniería mecánica*, J. Shigley, C. Mischke, 5ta ed. Pp 221-222.
4. W.D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering*. 5th ed., John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 2000, p 139-140
5. *Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels*, E.J. Pavlina and C.J Van Tyne, ASM International, 2008
6. *API 579-1/asme ffs-1 2007 fitness-for-service annex f material properties for a ffs assessment*, table f.10.
7. D. Tabor, *Hardness of Metals*, Clarendon Press, 1951. J.-H. Ahn, D. Kwon, J. Mater. Res. 16 (2001) 3170.
8. D. Tabor, *Hardness of Metals*, Clarendon Press, 1951. J.-H. Ahn, D. Kwon, J. Mater. Res. 16 (2001) 3170.
9. Ju-Young Kim, Kyung-Woo Lee, Jung-Suk Lee, Dongil Kwon, "Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach", *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 4278 – 4283.
10. Chang-Sung Seoka, K.L. Murty, "A study on the decrease of fracture resistance curve under reversed cyclic loading" (1999).

- 
11. F. Haggag et al. "The use of miniaturized tests to predict flow properties and estimate Fracture Toughness in Deformed Steel Plates", ASM Proceedings of the Fracture Mechanism Program of the International Conference and Exposition on Fatigue, Corrosion Cracking, Fracture Mechanics and Failure Analysis, Dec 1985, Salt-Lake city, Utah, pp 399.406.
  12. K.L. Murty, P.Q. Miragliaa, M.D. Mathewa, V.N. Shahb, F.M. Haggag
  13. "Characterization of gradients in mechanical properties of SA-533B steel welds using ball indentation" (1998)
  14. Takuya Yamamoto, Hiroaki Kurishita, Tetsuya Matsushima, Hideo Kayano
  15. "Development of innovative indentation system and its application to cyclic ball indentation test for small-sized specimens" (1996)