

Caracterización Mecánica de la ZAT en Aceros Bonificados Mediante el Uso de Probetas Miniatura

C. Rodríguez¹, J. García², E. Cárdenas¹ y F.J. Belzunce¹

¹INSTITUTO UNIVERSITARIO DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE ASTURIAS (IUTA), UNIVERSIDAD DE OVIEDO

²GENERAL DYNAMICS SANTA BÁRBARA SISTEMAS

RESUMEN

El ensayo SPT, "Small Punch Test" en denominación anglosajona, permite utilizar pequeñas probetas de 10x10x0.5 mm³ para la caracterización mecánica completa de cualquier material. Por esta razón, este ensayo resulta muy apropiado para caracterizar las zonas afectadas térmicamente (ZAT) de las uniones soldadas que, en virtud de su normalmente pequeña extensión, son de difícil caracterización, cuando por el contrario es en esas zonas donde estarán presentes las estructuras más duras y frágiles de la unión, y, consecuentemente, las responsables de la mayor parte de los problemas prácticos asociados a la realización de una unión soldada.

Dado que el ensayo SPT nos permite evaluar, a partir de probetas muy pequeñas, propiedades tales como el límite elástico, resistencia mecánica y ductilidad, en este trabajo se evaluó la variación de estas propiedades conforme nos movemos de una región a otra de la ZAT creada en el soldeo de un acero templado y revenido. Para ello se han extraído probetas de diferentes regiones de la ZAT de una unión soldada que posteriormente se han ensayado a temperatura ambiente mediante el ensayo SPT, habiéndose utilizado también como referencia el ensayo de dureza HV05 convencional y el ensayo de probetas de tracción miniatura extraídas de las mismas zonas de la ZAT con objeto de comprobar y validar los resultados obtenidos por medio del ensayo SPT. De este modo, en la soldadura evaluada se puede determinar con gran precisión las propiedades mecánicas de las distintas zonas de la ZAT e incluso discriminar el efecto de los revenidos provocados por las múltiples pasadas.

ABSTRACT

The Small Punch Test (SPT) allows to make the mechanical characterization of very small regions in any material as it uses very small specimens of 10x10x5 mm³. This test can be used to characterize the heat affected zones (HAZ) of welded joints, which mechanical properties are usually unknown, being the most problematic areas because of the possible existence of hard and brittle microstructures.

As the SPT can be used to obtain mechanical properties of small regions, as the yield strength, the ultimate strength, elongation, fracture energy and toughness, this test was used to evaluate how these properties modify inside the HAZ of a welded joint made on a quenched and tempered steel. Several specimens were machined along the HAZ and the corresponding SPTs were performed at room temperature, using also hardness HV10 and micro tensile tests as a reference to check and to validate SPT results. In this case we can determine exactly mechanical properties in the HAZ, even noticing tempering effects because of multipass welding.

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización del comportamiento mecánico de los elementos estructurales, a excepción de su dureza, es por definición destructiva, ya que requiere la extracción directa de probetas de ensayo del componente a evaluar. Por esta razón, si queremos evaluar un cierto componente sin dañarlo, debemos recurrir a la extracción de probetas cuyo tamaño sea lo suficientemente pequeño como para posibilitar la reparación del componente de forma sencilla. Esta forma de actuar implica el uso de probetas de pequeño tamaño (probetas miniatura) que, normalmente, no cumplen los requisitos establecidos en las correspondientes normas de ensayo. De este modo, en el curso de los últimos años, se han venido utilizando diferentes tipos de probeta con unas dimensiones inferiores a unos pocos centímetros para la evaluación de las propiedades a tracción, fatiga, tenacidad a la entalla (Charpy), tenacidad a la fractura, crecimiento de grietas por fatiga, etc., cuyos resultados deben ser convenientemente interpretados con el fin de derivar las propiedades de los componentes (de mucho mayor tamaño) de los que se han extraído las probetas [1,2].

Esta problemática es especialmente significativa en el caso de las uniones soldadas, donde la existencia de una pequeña zona afectada térmicamente (ZAT) puede llegar a plantear serios problemas de diseño y construcción que, aunque pueden solventarse, utilizando procedimientos y técnicas de soldeo apropiadas, provocan un cierto grado de incertidumbre sobre el

comportamiento mecánico de estas regiones bajo las cargas reales de servicio, dado que en virtud de su pequeño tamaño (normalmente solo unos mm.), no es posible caracterizarlas mecánicamente utilizando las técnicas de ensayo convencionales.

En este trabajo se analizará la aplicabilidad del ensayo SPT en la obtención de las características mecánicas a tracción (límite elástico, resistencia mecánica y alargamiento) de las diferentes zonas que caracterizan la región afectada térmicamente creada en el curso de una operación de soldeo realizada sobre un acero templado y revenido.

2. EL ENSAYO SPT (SMALL PUNCH TEST)

El ensayo miniatura de punzonado, o Small Punch Test, como se denomina en la literatura científico-técnica, es un procedimiento de ensayo que puede considerarse prácticamente como no destructivo, en virtud del tamaño tan reducido de las probetas que utiliza (sección de 10x10 mm² y tan sólo 0.5mm de espesor)[3,4,5,6]. Frente a otras técnicas no destructivas tales como rayos X, ultrasonidos o técnicas magnéticas, que se basan en medidas indirectas para estimar algunas de estas mismas propiedades, el SPT permite valorar directamente las propiedades mecánicas fundamentales de los materiales. El ensayo consiste en fijar firmemente la periferia de la probeta, empotrándola entre dos matrices, para posteriormente deformarla hasta su rotura, utilizando un punzón de cabeza semiesférica de 2.5mm de diámetro, tal y como se esquematiza en la figura 1.

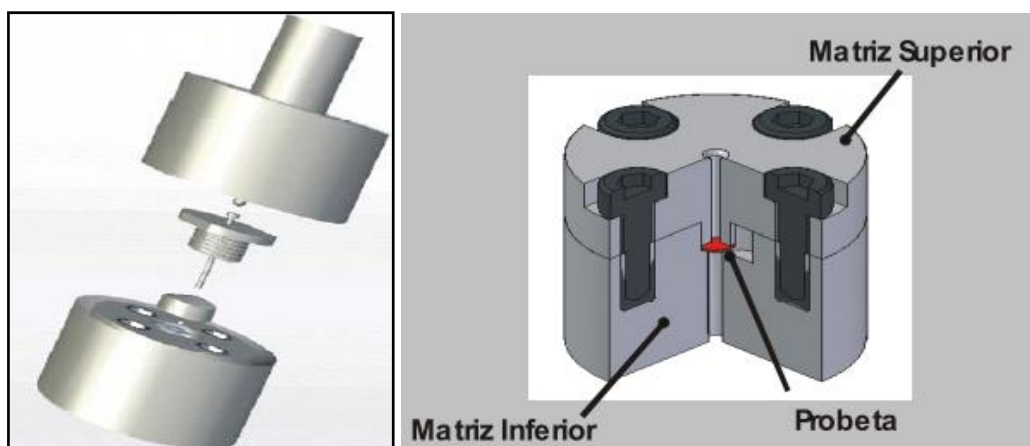


Figura 1. Representación esquemática de los útiles para el ensayo SPT

Durante el ensayo se obtiene un gráfico representativo de la fuerza ejercida por el punzón contra la probeta, frente al desplazamiento del punto central de la misma, que se mide con la ayuda de un extensómetro. En el caso de materiales dúctiles, como los que se han utilizado en este trabajo, se pueden distinguir en estas curvas carga-desplazamiento varias zonas (figura 2): **zona I** o de deformación elástica, **zona II** o de transición elastoplástica, **zona III** que corresponde a una deformación plástica generalizada y **zona IV** o de inestabilidad plástica y rotura.

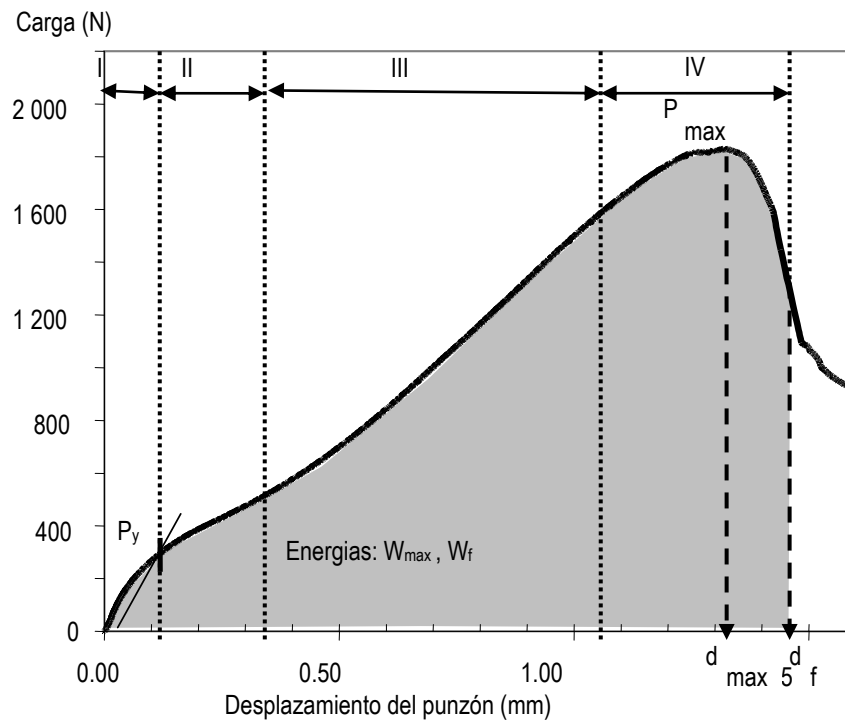


Figura 2. Curva carga-desplazamiento típica del SPT y parámetros característicos.

A partir de estas curvas es posible obtener una serie de parámetros característicos que están relacionados con las propiedades mecánicas fundamentales del material [7,8,9,10]. Estos parámetros son los siguientes:

- $[(P/d)_{ini}/t]$, donde $(P/d)_{ini}$ es la pendiente inicial del gráfico correspondiente a la región elástica (zona I) y t el espesor inicial de la probeta. Este parámetro está estrechamente relacionado con el módulo elástico, E , del material.

- P_y/t^2 , donde P_y es la fuerza para la que se inicia el régimen plástico, que se obtiene trazando una recta paralela al trazado inicial del gráfico desde un desplazamiento igual a $t/10$ (ver figura 2). Este parámetro es directamente proporcional al límite elástico, σ_{ys} , siendo las expresiones más utilizadas para expresar esta relación del tipo:

$$\sigma_{ys} = \alpha \cdot \frac{P_y}{t^2} \quad (1)$$

Donde α es un parámetro que depende de la familia de materiales que se esté caracterizando.

- P_{max}/t^2 , donde P_{max} es la fuerza máxima registrada en el ensayo. Este parámetro es directamente proporcional a la resistencia a la tracción, σ_u . En este caso, las expresiones más utilizadas son del tipo:

$$\sigma_u = \beta_1 \cdot \frac{P_{max}}{t^2} + \beta_2 \quad (2)$$

Donde β_1 y β_2 son parámetros que dependen no sólo del material sino también del coeficiente de fricción entre el material y el punzón.

- d_{max}/t , que es la deflexión en el punto de carga máxima adimensionalizada por el espesor de la probeta, y está directamente relacionadas con el alargamiento a tracción, A :

$$A(\%) = \gamma \cdot \frac{d_{max}}{t} \quad (3)$$

Donde, γ es un parámetro característico del material.

- W_{max}/t^2 y W_f/t^2 , siendo ahora W_{max} y W_f las energías absorbidas en el punto de carga máxima y en el de rotura (área debajo de la curva SPT hasta las deflexiones citadas) y que están relacionadas con la tenacidad del material.

3. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material objeto de estudio ha sido la zona afectada térmicamente (ZAT) de una soldadura en la que se utilizó como material base (BM) una chapa de 25mm de espesor de acero 30CrMo5-2 en estado de temple y revenido (QT) y como material de aporte (WM) un acero inoxidable austenítico tipo EN 1600 E 18 8 Mn B22. Las especificaciones en cuanto a composición química de ambos aceros se exponen en la tabla 1.

Material	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%Al
BM	0.33	0.32	0.72	0.87	0.25	-	<0.05
WM	0.08	0.9	7	19.2	0	9	0.28

Tabla 1. Composición química del material base y del aporte (% en peso)

Por su parte, la tabla 2 muestra las propiedades mecánicas convencionales (tracción y dureza) del acero base en estado de suministro, que correspondería a un bonificado tipo A6 (revenido a unos 500-550°C) según TL2350-000. Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente sobre probetas standard proporcional de sección circular y 10 mm de diámetro [Norma UNE....].

Material	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	A (%)	HB10
BM	1248	1380	12	290

Tabla 2. Propiedades mecánicas a tracción y dureza Brinell del acero 30CrMo5-2

Los cupones soldados se obtuvieron mediante soldadura a tope sobre un diseño de junta en K, realizada por ambos lados y técnica multi-pasada. El proceso de soldeo utilizado fue SMAW, con electrodos de 4 mm de diámetro.

La figura 3 muestra la macrografía de la unión soldada. En ella es posible observar una zona afectada térmicamente que tiene un ancho de unos 4.5mm desde la línea de fusión. Sobre la macrografía se han señalado las zonas de donde se han extraído las probetas SPT y las probetas de tracción miniatura.

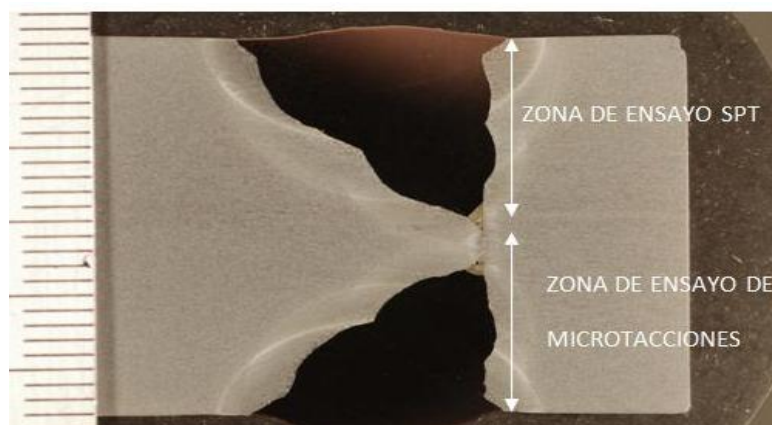


Figura 3. Macrografía de la unión soldada

Con objeto de situar de forma precisa las distintas zonas de la ZAT, se procedió tanto al estudio micrográfico de la unión mediante microscopía óptica, como a la realización de líneas de dureza Vickers con carga de 0.5kg, tanto en la zona de la raíz como en las dos caras. La figura 4 muestra la microestructura general de la unión, en la que puede apreciarse tanto la línea de fusión como las diferentes zonas de la ZAT.

Localizadas las distintas zonas de la ZAT, y con objeto de mecanizar las probetas para el ensayo SPT, se procedió a extraer, en dirección paralela al cordón, mediante electroerosión y partiendo de la línea de fusión, tiras longitudinales de 0.5mm de espesor que, cortadas de manera consecutiva, iban barriendo varias zonas de la ZAT. Estas tiras fueron numeradas consecutivamente del 1 al 6 conforme más distaban de la línea de fusión. A partir de esas tiras se cortaron probetas para la realización de los ensayos SPT con una sección de 10x10 mm². En la figura 4 se muestra, de forma esquemática, la secuencia de extracción de las tiras sobre la ZAT en las zonas de grano grueso (GHAZ), grano fino (FGHAZ), intercríticas (ICHAZ), revenidas (THAZ) y metal base, detectadas previamente por medios metalográficos.

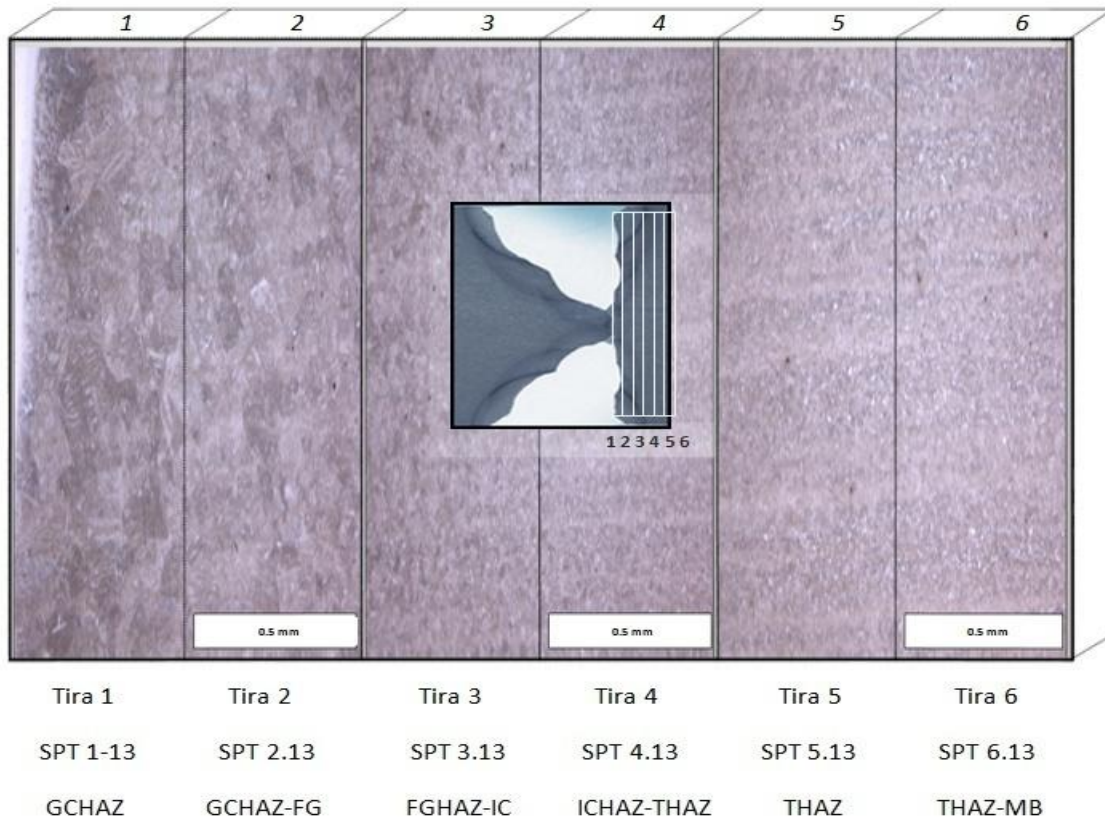


Figura 4. Microestructura de las diferentes zonas de la ZAT y situación de las muestras

Por su parte, la figura 5 muestra la secuencia de extracción de las probetas SPT de la parte superior de cada tira obtenida por electroerosión, así como de las probetas de tracción miniatura obtenidas de la parte inferior de la misma tira



Figura 5. Extracción de las probetas SPT y de las probetas de tracción a partir de la tira 1 (la más próxima a la línea de fusión).

Los ensayos SPT se realizaron utilizando un dispositivo experimental diseñado y fabricado en la EPSIG [11] acoplado a una máquina universal de ensayos dotada de una célula de carga de 10 kN. Durante la realización de los ensayos se registraron los datos carga-desplazamiento del punzón, que servirán de base para el cálculo de los distintos parámetros del ensayo, tal y como se describió en el apartado 2.

Por su parte, los ensayos de tracción sobre probetas miniatura se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos de 5kN de capacidad de carga a una velocidad de 2mm/min y haciendo uso de un extensómetro axial de 10mm de distancia inicial.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Microestructura y Propiedades mecánicas convencionales

La figura 6 recoge la evolución de la microestructura de la ZAT, partiendo de la línea de fusión hacia el metal base, y comparándola con la presentada por las 6 tiras extraídas en esa zona y de donde posteriormente fueron obtenidas las probetas ensayadas. Como puede observarse, la microestructura general mostrada, tanto en la ZAT como en el material base no afectado, es martensita en sus diversos estados: coarse (gruesa), fine (fina) o revenida.

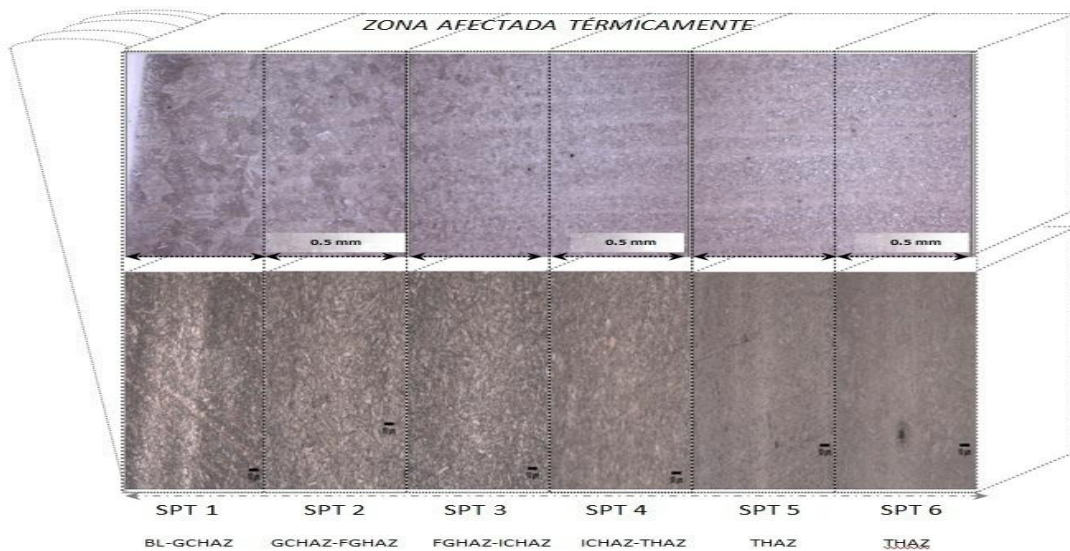


Figura 6. Microestructura y localización dentro de la ZAT de las diferentes probetas SPT ensayadas.

Por su parte, la figura 7 muestra la variación de dureza HV05 exhibida tanto por el material base como por el material de aporte y la ZAT tras la realización de líneas de dureza en distintas posiciones de la unión soldada: en la zona de raíz (línea 2) y en las dos caras a 2 mm de la superficie (líneas 1 y 3). Nótese la baja dureza del material de aporte (inoxidable austenítico de bajo carbono) y cómo la dureza varía en la ZAT en función del efecto térmico de revenido que cada pasada provoca sobre la anterior. También puede observarse cómo la dureza de la ZAT, aunque es bastante semejante a la del metal base, toma mayores valores en los puntos próximos a la línea de fusión para ir disminuyendo conforme nos alejamos hacia el metal base.

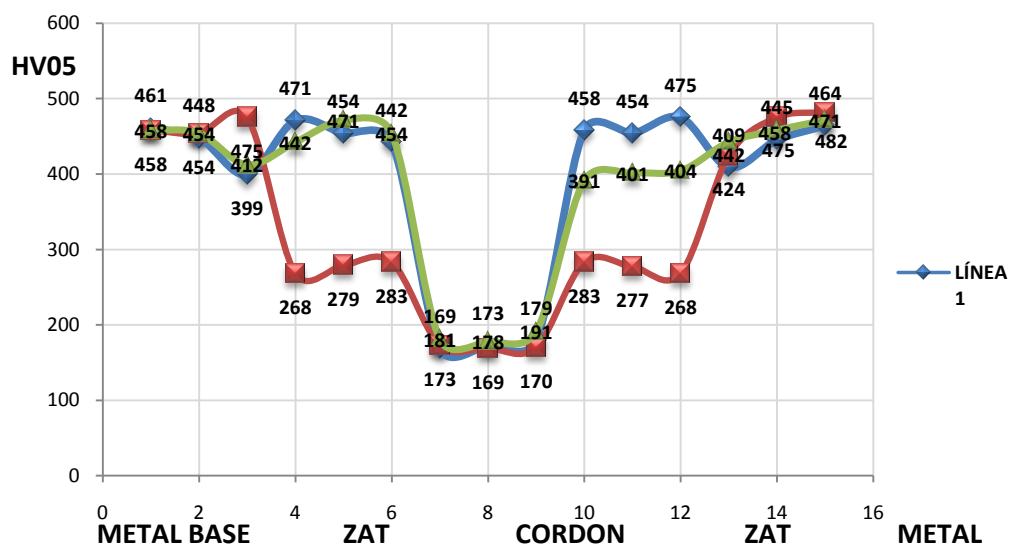


Figura 7. Variación de la dureza HV05 en las distintas zonas de la unión soldada

Por su parte la tabla 3 muestra el valor medio de los resultados obtenidos tras los ensayos de tracción sobre probetas miniatura obtenidas de las distintas zonas de la ZAT y del material base. Puede observarse que, como sucedía con los resultados de dureza, las propiedades mecánicas resistentes (límite elástico y resistencia a la tracción) disminuyen conforme nos alejamos de la zona fundida hacia el metal base. Lo contrario ocurre, lógicamente con el alargamiento.

Material	ZAT1	ZAT2	ZAT3	ZAT4	ZAT5	ZAT6
σ_{ys} (MPa)	1128	1103	1105	997	950	909
σ_u (MPa)	1250	1212	1227	1110	1076	1039
A (%)	5.5	5.2	6.8	7.6	9.9	10

Tabla 3. Propiedades mecánicas a tracción sobre probetas de tracción miniatura en las distintas zonas de la ZAT y del metal base

Propiedades obtenidas a partir del ensayo SPT

La Tabla 3 recoge los valores de los parámetros característicos obtenidos con las diferentes probetas ensayadas, una vez normalizados teniendo en cuenta el espesor de cada probeta de ensayo. En la tabla también se recogen la media y la desviación standard de cada parámetro obtenidos tras el ensayo de al menos 5 probetas de cada zona de la ZAT. Por su parte, la figura 8 muestra a modo de comparación algunas curvas SPT representativas de cada zona de la ZAT

Probeta N°		$P_y(t/10)/t^2$ (MPa)	P_{max}/t^2 (MPa)	d_{max}/t	W_{max}/t^2 (kJ/m ²)
ZAT 1	V. Medio	2497.00	10009.3	2.65	3.81
	Desv. St.	72.08	511.02	0.13	0.2
ZAT 2	V. Medio	2249.00	10033.94	2.87	4.03
	Desv. St.	95.07	171.98	0.11	0.15
ZAT 3	V. Medio	2114.00	9293.55	2.93	4.08
	Desv. St.	61.10	63.35	0.13	0.15
ZAT 4	V. Medio	1955.00	8632.14	2.42	1.96
	Desv. St.	203.72	1391.40	0.48	1.14
ZAT 5	V. Medio	2408.00	7463.53	1.73	1.80
	Desv. St.	391.52	466.12	0.14	0.11
ZAT 6	V. Medio	3143.00	8088.76	1.73	2.10
	Desv. St.	145.83	746.14	1.50	1.70

Tabla 3. Parámetros característicos divididos por la correspondiente potencia del espesor (valores medios y coeficientes de variación)

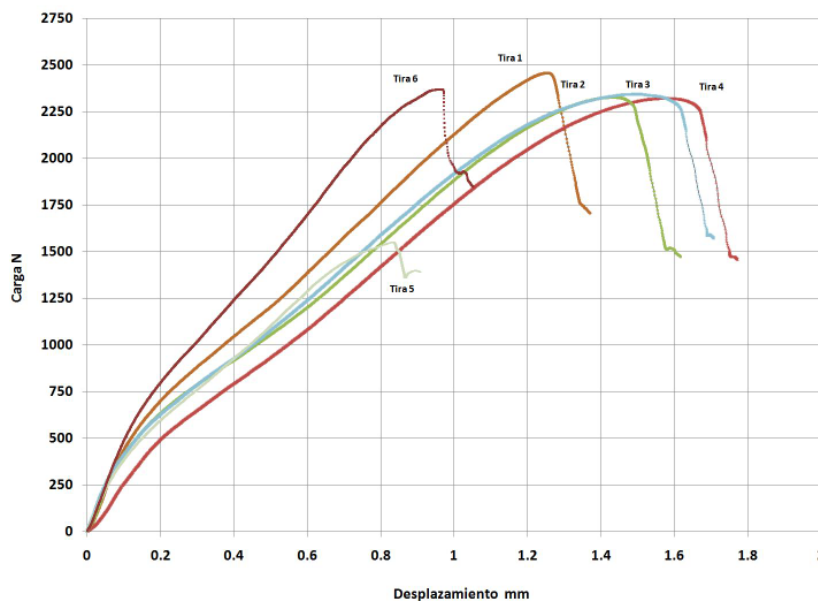


Figura 8. Curvas SPT representativas de cada zona de la ZAT

Puede observarse como los parámetros $P_y(t/10)/t^2$ y P_{max}/t^2 relacionados, respectivamente, con el límite elástico y con la resistencia mecánica del material también decrecen conforme nos alejamos de la línea de fusión hasta la tira 6 que muestra una fuerte rigidización. El parámetro d_{max}/t , relacionado con el alargamiento crece conforme nos alejamos de la línea de fusión pero cae bruscamente al llegar a las tiras 5 y 6.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los parámetros característicos obtenidos en el ensayo SPT, podríamos obtener las propiedades mecánicas resistentes (σ_{ys} , σ_u y A), que previsiblemente tiene el material en las diferentes zonas de la ZAT, sin más que aplicar las ecuaciones (1), (2) y (3) utilizando los coeficientes oportunos.

En el caso del coeficiente α , la mayoría de los autores coinciden en señalar que su valor es de 0.36 para los aceros ferríticos y de 0.41 para los martensíticos. Dado que el material base es un acero templado y revenido, parece lógico otorgar a α un valor de 0.41. La tabla 4 recoge los valores del límite elástico (MPa), calculados de este modo.

En esta misma tabla se recogen los valores de la resistencia a la tracción y el alargamiento tras aplicar las relaciones (2) y (3) respectivamente, utilizando como parámetros β_1 , β_2 y γ , los propuestos por Ruan et al. [10] y Fleury y Ha [7] para aceros del tipo de los utilizados en este estudio.

	$\sigma_{ys} = \alpha P_y / t^2$ $\alpha=0.41$	$\sigma_u = \beta_1 P_{max} / t^2 + \beta_2$ $\beta_1=77\pm15 \beta_2= 218\pm101$	$A(\%)= \gamma d_{max} / t$ $\gamma=7$
ZAT 1	1023.58±34.12	1139.76±48.38	18.56±1.02
ZAT 2	921.92±45.00	1141.78±16.28	20.06±0.81
ZAT 3	866.62±28.92	1081.07±6.18	20.52±1.05
ZAT 4	863.21±48.87	1061.35±124.84	18.47±3.57
ZAT 5	977.22±185.36	1698.16±115.16	12.13±1.12
ZAT 6	1219.57±69.09	1840.34±187.82	12.06±1.57

Tabla 4. Propiedades mecánicas de las distintas zonas de la ZAT obtenidas a partir de las relaciones (1) (2) y (3).

Como puede observarse que con la excepción de las tiras 5 y 6, los resultados de σ_{ys} , σ_u son muy semejantes a los obtenidos en el ensayo de tracción (ver figura 9). No ocurre lo mismo con el alargamiento que es mucho mayor que el obtenido en el ensayo de tracción lo que podría ser debido a que el coeficiente γ en nuestro caso debería ser más bajo ($\gamma=2.2$).

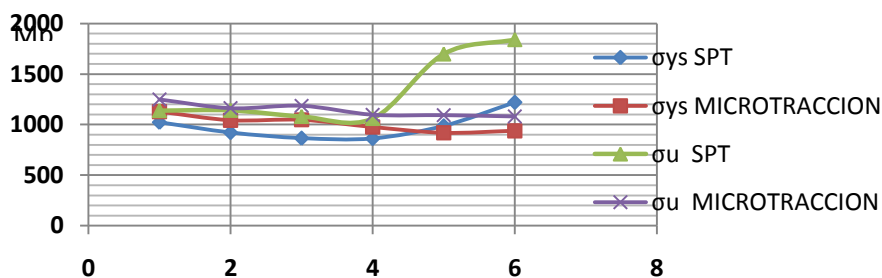


Figura 9. Comparación de las propiedades mecánicas obtenidas en las zonas de la ZAT.

De todos modos, la razón del extraño comportamiento de las tiras 5 y 6 podría provenir de que el material del que provienen las tiras utilizadas para los ensayos de tracción y para los SPT no sea exactamente el mismo. Parece que mientras que las tiras utilizadas en los ensayos de tracción provienen todas de la ZAT, las tiras 5 y -sobre todo- la 6 utilizadas en los ensayos SPT podrían no ser representativas de la ZAT sino del metal base que como se reflejaba en la tabla 2 mostraba unos valores de límite elástico y resistencia mecánica mucho más elevado que el mostrados por la ZAT en sus distintas zonas.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la posibilidad de utilizar el ensayo SPT para la caracterización mecánica de las distintas zonas que caracterizan la ZAT de una unión soldada en el caso de un acero templado y revenido, no solo cualitativamente sino incluso obteniendo valores fiables del límite elástico, resistencia a la tracción y alargamiento, utilizando para ello expresiones que han sido previamente validadas experimentalmente, la diferencia debida al límite elástico obtenido por medio del SPT en la tira 6 y el correspondiente al obtenido por medio de ensayos de tracción se debe a que la probeta de microtracción se extrae de una zona

afectada por el ciclo térmico de las 3 sucesivas pasadas del proceso de soldeo en esa zona, mientras que la tira SPT podría estar dentro del metal base y haber sido afectada por la última pasada de soldeo.

En una ZAT de una soldadura de un acero templado y revenido de aproximadamente 4,5 mm de ancho se han diferenciado 6 zonas características y se ha comprobado que al alejarnos de la línea de fusión se observa una caída progresiva de las propiedades mecánicas debidas al efecto de sobre revenido que el proceso de soldeo provoca sobre el material original, siendo recuperadas las propiedades originales de éste según nos alejamos de los efectos térmicos de la soldadura. Por último, dada la prometedora aplicabilidad del ensayo SPT para la caracterización mecánica de materiales a partir de probetas de tamaño muy reducido, este tipo de ensayo se perfila como muy idóneo en la caracterización de regiones de muy pequeño tamaño, tales como las ZAT de las uniones soldadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lucon E., "Material damage evaluation and residual life assessment of primary power plant components using specimens of non-standard dimensions", *Mater. Scie. Tech.*, 17, pag. 777-785, 2001.
- [2] Lucas G.E. et al, "Recent progress in small specimen test technology", *J. Nucl. Mater.*, 307-311, pag. 1600-1608, 2002.
- [3] Manahan M.P. et al., "The development of a miniaturized disk bend test for determination of post irradiation mechanical properties", *J. Nucl. Mater.*, 103-104, pag. 1454-1550, 1981.
- [4] Mao X. Y Takahashi H., "Development of a further miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk small punch tests", *J. Nucl. Mater.*, 150, 42-52, 1987.
- [5] Parker et al, "Deformation and fracture processes in miniature disc tests of CrMoV rotor steel" *Proc. 3rd. Int. Charles Parsons Turbine Conf.*, 2, 418-428, 1995.
- [6] Bicego et al. "Integrated technologies for life assessment of primary power plant components", *Proc. Int. Symp. on Materials Ageing and Components Life Extension.*, 1, 295-305, 1995.
- [7] Fleury E., Ha J.S. "Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant" *Int. J. Press. Vessels and Piping*, 75,699-706, 1998.
- [8] Vorlicek et al., "Evaluation of a miniaturized disc test for establishing the mechanical properties of low-alloy steels", *J. Mater. Scie.*, 30, pag. 2936-2943, 1995.
- [9] Foulds J. y Viswanathan R., "Determination of the toughness of in-service steam turbine disks using small punch testing", *J. Mater. Eng. Perform.* 10, 5, pag. 614-619, 2001.
- [10] Ruan Y., Spätig P. y Victoria M., "Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests", *J. Nucl. Mater.*, 307-311, pag. 236-239, 2002.
- [11] Rodríguez C., Belzunce F.J., Betegón C. y Contreras M.A., "Uso del EMP para la caracterización mecánica de zonas afectadas térmicamente en uniones soldadas", *Soldadura y Tecnologías de Unión*, 109, 16-21, Enero/Febrero 2008.