

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN MEDIANTE ENSAYOS SMALL PUNCH EN LA ZONA AFECTADA POR LOS CORTES TÉRMICOS

D. Andrés^{1,*}, T. García¹, S. Cicero¹, R. Lacalle¹, J. A. Álvarez¹, A. Martín-Meizoso², J. Aldazabal²

¹Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria,
Av/ Los Castros s/n, 39005, Santander, España.

*E-mail: andresd@unican.es

²Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT),
C/ Manuel de Lardizábal, 15, 20018, San Sebastián, España.

RESUMEN

Los sistemas de corte térmico provocan una alteración de la zona de material anexa a los bordes de corte, pudiendo así afectar a su comportamiento en servicio. Este artículo pretende aplicar la técnica *Small Punch* para comparar las propiedades a tracción en el material base y en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) generada por los distintos procesos de corte. El material seleccionado es un acero estructural S460M y se consideran tres métodos de corte térmico con gran trascendencia en ingeniería (oxicorte, corte por plasma y corte por láser). En los bordes de corte resultantes tras cada uno de estos tres procedimientos se ha obtenido la microestructura, se han realizado perfiles de dureza y se han determinado las propiedades de tracción mediante probetas *Small Punch*. Se ha observado una modificación significativa de las propiedades en la ZAT respecto de las obtenidas en el material base y una variación de las mismas en función de la técnica de corte seleccionada.

PALABRAS CLAVE: Corte, Acero S460M, *Small Punch*.

ABSTRACT

Thermal cutting processes cause variations in the material next to cutting edges, which may affect its subsequent in-service behaviour. The aim of this paper is to apply the Small Punch technique in order to compare the tensile properties of the base material and the Heat Affected Zone (HAZ) generated by different cutting processes. S460M structural steel has been chosen for this purpose, analysing three different thermal cutting methods of great influence in engineering (oxy-fuel, plasma and laser cutting). Microstructure, hardness profiles and tensile properties by means of Small Punch specimens have been obtained at the resulting cutting edges after the employment of each of these three processes. As a result, a significant deviation of the HAZ properties from the ones obtained for the base material has been observed, as well as an influence of the applied cutting method on the alteration of these properties.

KEYWORDS: Cutting system, S460M, Small Punch.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de corte forman una parte esencial en el proceso de construcción de cualquier componente de acero, en tanto que permiten transformar las piezas suministradas por las acerías (con dimensiones estandarizadas), en piezas con geometrías específicas para cada tipo de componente.

Entre el conjunto de las diferentes técnicas de corte existentes en la actualidad, hay que destacar las de tipo térmico, las cuales constituyen una tecnología ampliamente extendida en el ámbito de la industria naval, calderería, etc., o el propio sector de la construcción. Sus principales ventajas son su versatilidad y la elevada capacidad de producción que

permiten alcanzar. Sin embargo, presentan el inconveniente de introducir cambios en el material afectado térmicamente debido a las altas temperaturas requeridas para poder completar el proceso de corte. Dichas alteraciones convierten al material de estas zonas en un material nuevo, con diferente microestructura, y consecuentemente, diferentes propiedades respecto al material base.

De manera general, bajo cargas estáticas, estas alteraciones no influyen en el comportamiento de los componentes. En cambio, frente a cargas dinámicas, la zona afectada térmicamente puede reducir de manera muy significativa la vida útil de los mismos [1], debido a la topografía resultante de la superficie, las tensiones

residuales generadas y los cambios microestructurales producidos durante el corte.

En este trabajo se pretende evaluar la influencia de tres métodos de corte térmico en las propiedades de la zona afectada térmicamente (ZAT) generada. Para ello, se han seleccionado tres tipos de corte: oxiacorte, corte con plasma y corte con láser. El primero, tradicionalmente empleado por la industria, se basa en la formación de óxidos de hierro, que al presentar puntos de fusión inferiores al del material base, son arrastrados por el impacto de un chorro de oxígeno a alta presión. El corte con plasma, en cambio, consigue la fusión del material al alcanzar temperaturas de hasta 30.000° C mediante el arco eléctrico formado entre la pieza y el elemento de corte. Por último, el corte con láser consigue la fusión del material gracias a la concentración de un haz con elevada densidad de energía en un punto sobre o inmediatamente bajo la superficie del material.

Aunque tanto el corte por plasma como el corte por láser permiten en ocasiones alcanzar una mayor productividad y mejor calidad de corte que el oxiacorte, en un gran número de casos tales mejoras no tienen reflejo en la normativa actual. Por otro lado, en los casos en que sí están consideradas, se establecen criterios habitualmente conservadores, al estar basados únicamente en las calidades obtenidas con el oxiacorte. Por ello, resulta de especial importancia la correcta caracterización de estos métodos.

Para conseguir evaluar la influencia de los procesos de corte en las propiedades de la ZAT generada, se ha planteado realizar un análisis de la microestructura, de la dureza y de las propiedades de tracción en esta región. Este último punto supone un reto, dado que su realización es imposible mediante metodologías tradicionales, que requieren grandes volúmenes de material para caracterizar el material, no disponibles en este caso debido al reducido espesor de la ZAT. Por ello, se plantea el uso de la técnica de ensayos *Small Punch*, surgida en la década de los 80 en el MIT para la caracterización de materiales irradiados [2]. Se trata de un ensayo miniatura, consistente en el punzonamiento de probetas de 0.5 mm de espesor, que puede llegar a ser considerado como ensayo no destructivo. Gracias a las reducidas dimensiones de las probetas empleadas, es capaz de evaluar las propiedades en zonas concretas del material, razón por la cual ha sido elegido en este trabajo.

En definitiva, se ha analizado la influencia de tres métodos de corte en un acero estructural mediante la obtención de los cambios en las propiedades a tracción, obtenidas mediante ensayos *Small Punch*, así como los cambios microestructurales y variaciones de dureza del material.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material elegido ha sido un acero S460M suministrado en forma de chapa laminada de 15 mm de espesor. Se trata de un acero estructural ampliamente utilizado en la construcción de puentes, edificación, maquinaria o calderería. Con un bajo contenido en carbono, se trata de un acero laminado en caliente, cuya composición química y propiedades mecánicas se reflejan en la Tabla 1, y cuya microestructura ferrítico-perlítica bandeada se aprecia en la Fig. 1.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero S460M.

| Composición química | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
| 0.12 | 0.45 | 1.49 | .012 | .001 | .062 | .001 | .016 |
| Al | Cu | Nb | N | Sn | Ti | V | CEV |
| .048 | .011 | .036 | .005 | .002 | .003 | .066 | 0.39 |
| Propiedades mecánicas | | | | | | | |
| Módulo de Elasticidad (GPa) | | Límite Elástico, R_e (MPa) | | Tensión de Rotura, R_m (MPa) | | | |
| 205.35 | | 484.1 | | 594.4 | | | |

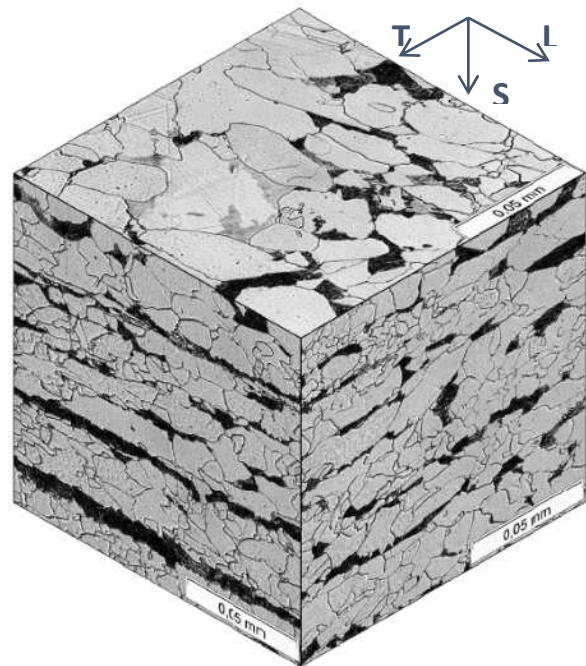


Fig. 1. Microestructura del acero S460M, de tipo hipoeutectoide, formada por ferrita poligonal (de color claro) y bloques de perlita con un tamaño de grano de 6.18 μm, de acuerdo con ASTM E112 [3].

2.2 Procedimientos de corte térmico

Con el objeto de asegurar una mayor representatividad de las condiciones reales en componentes, los cortes fueron realizados con los parámetros habituales en la industria del acero para el espesor considerado, cuyos valores se reflejan en las tablas 2 a 4 para los tres procesos de corte térmico considerados.

Tabla 2. Parámetros del método oxicorte.

| Parámetro | Valor | |
|--------------------|----------------|---------|
| Velocidad de corte | 0.45-0.5 m/min | |
| Presión de propano | 0.4 bar | |
| Presión de oxígeno | Pre | 1.2 bar |
| | Corte | 6 bar |

Tabla 3. Parámetros del corte con plasma.

| Parámetro | Valor | |
|---|-----------|----------|
| Corriente del arco | 200 A | |
| Voltaje del arco | 131 V | |
| Velocidad de corte | 2.2 m/min | |
| Altura de la antorcha | 4.1 mm | |
| Gas plasma: Flujo de oxígeno | Pre | 24 l/min |
| | Corte | 69 l/min |
| Gas auxiliar: Flujo de aire | Pre | 65 l/min |
| | Corte | 28 l/min |
| Tiempo de perforación inicial | 0.6 s | |
| Altura de la antorcha en la perforación inicial | 8.2 mm | |

Tabla 2. Parámetros del corte con láser.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|---------------------|
| Energía | 3600 W |
| Velocidad de corte | 1 m/min |
| Diámetro de la boquilla | 1.7 mm |
| Altura de la boquilla | 0.5-0.8 mm |
| Diámetro del foco | 0.2 mm |
| Posición del foco | Sobre la superficie |
| Gas auxiliar | Oxígeno |
| Presión del gas auxiliar | 0.6 bar |

2.4. Evaluación de la dureza del material

Para poder evaluar cambios en la dureza del material, se emplearon microdurezas de tipo Vickers HV05, de acuerdo con las recomendaciones de ASTM E384 [4], debido a los reducidos espesores de las zonas afectadas térmicamente. De esta manera se obtuvieron perfiles de durezas a mitad de espesor de la chapa, teniendo siempre en cuenta la separación mínima de 3 diámetros a la superficie libre del corte.

En el caso de corte por láser, se obtuvo el perfil en la zona inferior del corte para poder realizar una mejor caracterización del mismo, teniendo en cuenta las reducidas dimensiones de la ZAT en este caso.

2.5. Evaluación de las propiedades a tracción

Las propiedades a tracción fueron obtenidas a partir de ensayos *Small Punch*, de acuerdo con las recomendaciones de [4]. En este caso, la principal dificultad metodológica fue la obtención de probetas, ya que debían extraerse lo más próximas posible a la superficie de corte, garantizando un espesor homogéneo de 0.5 mm. Para ello, se obtuvieron piezas de 10 x 10 mm en el centro de la superficie de corte, paralelas a dicha superficie, de 1 mm de espesor, mediante una cortadora de precisión refrigerada. Estas fueron pulidas por el lado de la superficie de corte la mínima cantidad posible hasta conseguir una superficie plana, puliendo por la otra cara el espesor necesario hasta alcanzar el espesor final requerido por el ensayo. Con este procedimiento se ha tratado de garantizar la correcta evaluación de la ZAT.

Una vez obtenidas las probetas, estas fueron ensayadas, de acuerdo con [4], evaluando los resultados obtenidos mediante la formulación planteada en [5].

3. RESULTADOS

3.1. Análisis microestructural

Tal como se comprueba en la Fig. 2, los diferentes métodos de corte afectan de manera diferente a la microestructura del material. Se observa que el mayor tamaño de la ZAT corresponde al oxicorte, seguido por el plasma y finalmente por el láser. Esto se debe al diferente aporte térmico proporcionado por cada método de corte. El oxicorte se caracteriza por un aporte térmico muy elevado, lo cual se traduce, como se observa en la Fig. 2, en una ZAT muy ancha. Por el contrario, debido a las elevadas velocidades de corte alcanzadas en el plasma y el láser, el aporte térmico es significativamente inferior, lo cual da lugar a una ZAT menos profunda (Fig. 2).

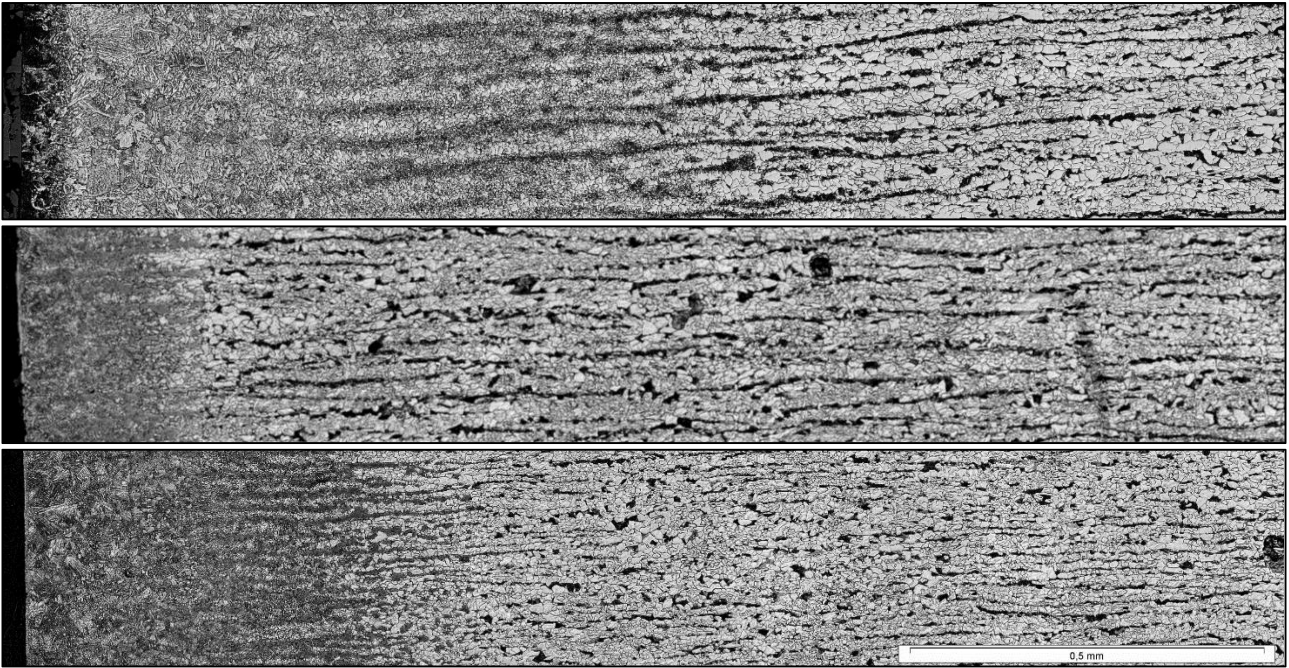


Fig. 2. Microestructuras obtenidas en el borde de corte, siendo la superior la correspondiente al oxicorte, la microestructura intermedia la correspondiente al corte con láser, y la inferior la correspondiente al corte por plasma.

En relación a los tamaños de la ZAT para su caracterización mediante ensayos SP, se comprueba que tanto el oxicorte como el corte con plasma tienen una ZAT mayor que el espesor de la probeta, lo cual posibilita su correcta caracterización. En el caso del láser, se comprueba que, debido a las dimensiones de las probetas SP, de espesor 0.5 mm, y a las dimensiones de la ZAT en este caso, cabe la posibilidad de evaluar en el espesor de 0.5 mm de la probeta SP cierta cantidad de material base.

3.2. Análisis mediante microdurezas

Los perfiles de microdurezas obtenidos se muestran en la Fig. 3. En ellos se refleja, en concordancia con los resultados obtenidos en las microestructuras, que el mayor tamaño de ZAT aparece empleando oxicorte, con valores menores en el caso de los cortes por plasma y láser. En el corte por láser se observa un tamaño de la ZAT ligeramente superior a la que se obtiene en la mitad del espesor (mostrado en la Fig. 2), al haber evaluado la zona inferior del mismo para garantizar una correcta medición de los valores de dureza.

Cuantitativamente, los mayores valores de dureza aparecen en las superficies de corte por láser, posiblemente debido a un enfriamiento más rápido que en los otros casos. El caso del oxicorte, al proporcionar el mayor aporte térmico (consiguiendo así la menor velocidad de enfriamiento), presenta valores de dureza inferiores al resto de métodos, ocupando el corte por plasma valores intermedios más próximos al láser.

En relación al espesor de la ZAT y su efecto en la caracterización de las propiedades a tracción en base a los perfiles de microdurezas obtenidos, se observa que en los tres métodos el tamaño de la zona endurecida supera los 0.5 mm requeridos para la obtención de la probeta *Small Punch*. Consecuentemente, quedaría justificada la correcta evaluación de las propiedades empleando dicha metodología, en base a los resultados aquí obtenidos.

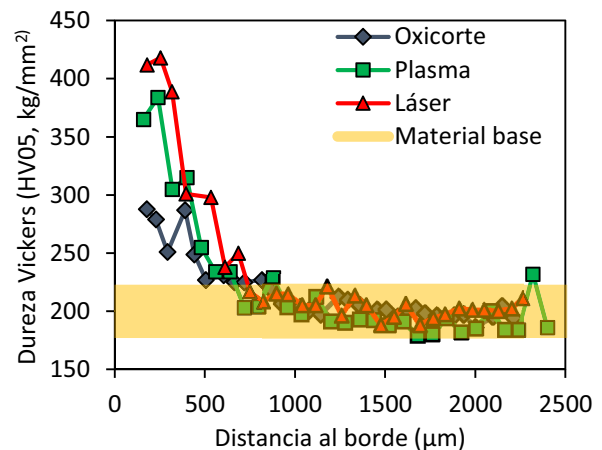


Fig. 3. Representación de los valores de las microdurezas obtenidas para los diferentes métodos de corte respecto a la distancia al borde de corte.

3.3. Análisis mediante ensayos *Small Punch*

Las curvas obtenidas mediante los ensayos *Small Punch* se muestran en la Fig. 4, así como las fractografías de las probetas ensayadas en la Fig. 5. A partir de su

análisis, se comprueba que el conjunto de los casos analizados se comporta de manera dúctil, con roturas en forma de media luna [5]. También se puede observar una mayor ductilidad en el caso del oxicorte y el material base, siendo menor para el caso del plasma e intermedia para el caso del láser. Por otro lado, se observa que los ensayos correspondientes al plasma son los que soportan una mayor carga, estando los del oxicorte los más próximos al material base.

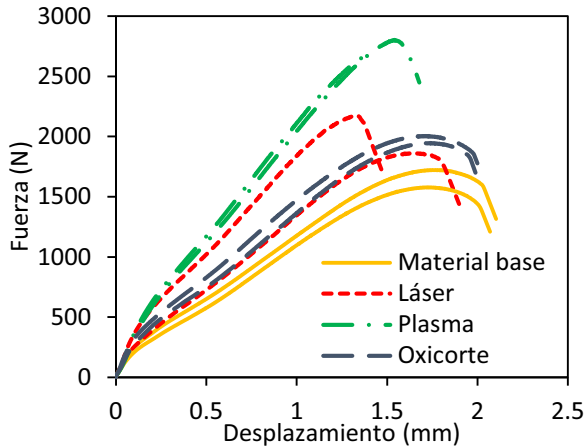


Fig. 4. Representación de las curvas obtenidas en los ensayos *Small Punch*, representando la fuerza aplicada frente al desplazamiento del punzón.

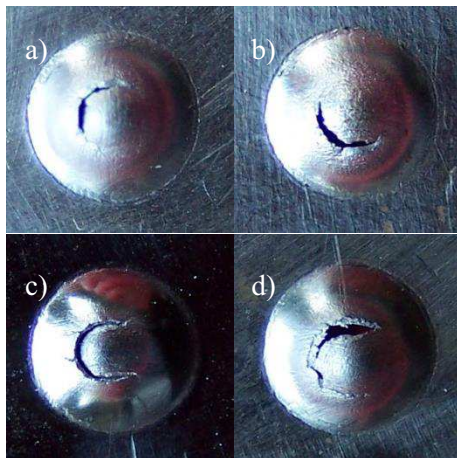


Fig. 5. Fractografías de las probetas *Small Punch* ensayadas: a) Material base, b) Oxicorte, c) Láser, d) Plasma.

En los ensayos realizados en la ZAT resultante del corte con láser se observa una dispersión mayor que en el resto de los casos, con un comportamiento más frágil en el caso de la primera curva, con una carga de rotura de mayor, y un comportamiento próximo al material base en la segunda. Se ha constatado que en este último caso, el material presentaba una mayor rugosidad superficial, por lo que fue necesario un mayor rebaje de material en la cara de la probeta correspondiente a la superficie de corte. Debido a esto, se observa que en esta probeta

posiblemente se haya evaluado parcialmente material base. Consecuentemente, se han obtenido las propiedades a tracción para corte con láser a partir de la primera probeta, en la cual se ha asegurado la incorporación de una parte importante del ancho de la ZAT en el espesor de la probeta.

A partir de los datos obtenidos, se han deducido las propiedades a tracción, de acuerdo con [5], mostrando los resultados en la Fig. 6. En el caso del plasma, se observa una gran modificación de las propiedades respecto al material base, duplicando, aproximadamente, los valores de límite elástico y de tensión de rotura respecto a este. En cuanto al oxicorte, se observa un incremento en los mismos, quedando patente la influencia de la ZAT, aunque siendo estos de menor magnitud que en el caso del plasma.

La causa del gran aumento en la capacidad a tracción en la superficie producida por el corte con plasma o por láser puede deberse a la rápida velocidad de enfriamiento de este método, generando así estructuras más duras que en el caso del oxicorte, cuya velocidad de enfriamiento es menor, razón por la cual sus propiedades son más similares a las del material base.

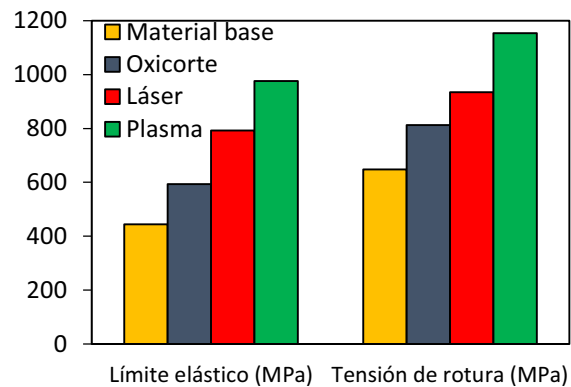


Fig. 6. Cuadro comparativo con los valores del límite elástico y de la tensión de rotura obtenidos mediante ensayos *Small Punch*.

En el caso del corte por láser, se observa que se han obtenido unas propiedades intermedias entre el corte por plasma y el oxicorte. Si se analizaran los valores de microdurezas obtenidos, se podría derivar un mayor límite elástico y último para el láser, respecto al corte por plasma. Esta aparente discrepancia puede deberse a que los espesores de ZAT en el caso del láser son inferiores al espesor de la probeta, sobre todo si se tiene en cuenta que en el caso de las microdurezas fue necesaria la evaluación en la zona inferior del espesor para garantizar su correcta medición. Por ello, en la caracterización SP parte del material analizado es el base. A pesar de ello, queda patente la influencia de la ZAT, obteniéndose valores cercanos a los obtenidos mediante el corte con plasma.

Por último, para validar la caracterización de las propiedades de tracción mediante el uso de ensayos SP, se han comparado los resultados SP obtenidos con los obtenidos para el material base mediante ensayos convencionales, en primer lugar, y con los resultados obtenidos mediante microtracciones en los casos del oxicorte [6], el plasma [7] y el láser [8]. Los resultados se muestran en las figuras 7 (límite elástico) y 8 (tensión de rotura).

En el caso del material base, se comprueba que los resultados se encuentran en un margen de $\pm 10\%$ respecto a los valores obtenidos mediante ensayos convencionales, quedando validados. Al comparar los resultados obtenidos mediante SP con las microtracciones se obtiene una diferencia del $\pm 15\%$. Esto supone un margen inferior al aceptado habitualmente en los ensayos SP ($\pm 20\%$), traducándose en la validación de la aplicación del ensayo *Small Punch* para la caracterización de las propiedades de tracción en la ZAT generada por un proceso de corte térmico.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha validado el empleo del ensayo *Small Punch* para la caracterización de las propiedades de tracción de las zonas afectadas térmicamente producidas por diferentes métodos de corte térmico, confirmándose la adecuación del método mediante la comparación de resultados con otras metodologías de ensayo. Consecuentemente, el ensayo *Small Punch*, por su simplicidad, se convierte en un candidato idóneo para tales fines, garantizando la estimación de propiedades para ZAT con espesores superiores a 0.5 mm.

En base a los ensayos *Small Punch*, se ha determinado que tanto el límite elástico como la tensión de rotura en la ZAT generada por los procesos de corte térmico son mayores que los correspondientes al material base, siendo particularmente elevados en el caso del corte por plasma y el corte por láser.

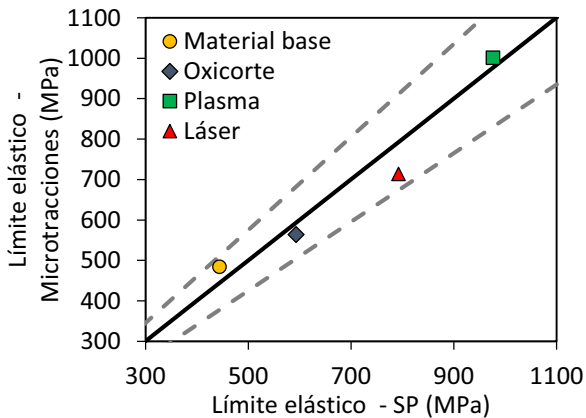


Fig. 1. Comparación de valores de límite elástico, con bandas de error del 15%.

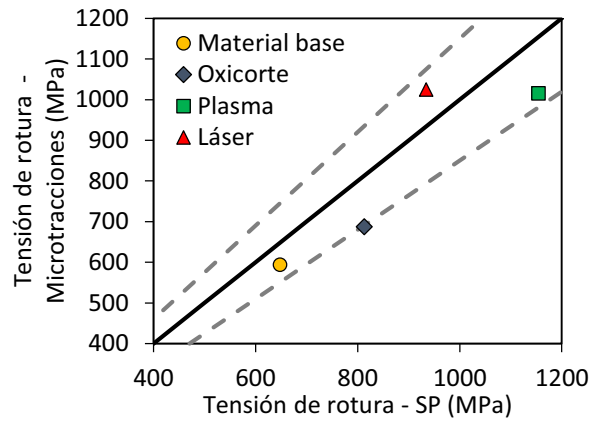


Fig. 2. Comparación entre los valores de tensión de rotura, con bandas de error del 15%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al MINECO la financiación recibida del proyecto MAT2011-28796-C03-01 y a la Comisión Europea la financiación del proyecto HIPERCUT: "High Performance Cut Edges in Structural Steel Plates for Demanding Applications", de cuyos resultados se deriva este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Meurling, F., Melander, A., Linder, J., Larsson, M., "The influence of mechanical and laser cutting on the fatigue strengths of carbon and stainless sheet steels" Scand J Metall, vol. 30, no. 5, pp. 309-319.
- [2] Manahan, M.P., Argon, A.S., Harling, O.K., "The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties" J.Nucl.Mater., vol. 104, no. C, pp. 1545-1550.
- [3] ASTM E112-12, "Standard test methods for determining average grain size" American Society for Testing and Materials.
- [4] ASTM E384-11e1, "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials" American Society for Testing and Materials..
- [5] Lacalle Calderón, Universidad de Cantabria., "Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos Small Punch : Tesis Doctoral", 2012.
- [6] Martín-Meizoso, A., Aldazabal, J., Pedrejón, J.L. y Moreno, S., "Caracterización de la Zona Afectada por un Oxicorte" Anales de Mecánica de la Fractura 31, 04/04/2014, pp. 595.
- [7] Martín-Meizoso, A., Aldazabal, J., Bannister, A., Klimpel, A., Cicero, S., "Resilience and Ductility of Plasma Cut HAZ" Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Under review.
- [8] Martín-Meizoso, A., Aldazabal, A. J., Proyecto europeo HIPERCUT, comunicación interna.