

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ZONAS AFECTADAS POR UN CORTE LÁSER, CORTE POR PLASMA Y OXICORTE DE UNA CHAPA DE ACERO S460M DE 15 MM DE ESPESOR

J. Aldazabal<sup>1\*</sup>, A. Martín-Meizoso<sup>1</sup>, A. Bannister<sup>2</sup>, S. Cicero<sup>3</sup>, A. Klimpel<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ceit y Tecnun (Universidad de Navarra) Manuel de Lardizábal, 15, 20018 San Sebastián

<sup>2</sup>Tata Steel, Swinden Technology Centre, Moorgate, Rotherham S60 3AR, Reino Unido

<sup>3</sup>Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros 44, 39005 Santander

<sup>4</sup>Politechnika Slaska - Sutil, Akademica 2<sup>a</sup>, 44-100 Gliwize, Polonia

\* E-mail: [jaldazabal@ceit.es](mailto:jaldazabal@ceit.es)

### RESUMEN

Se presentan los mini ensayos de tracción realizados sobre láminas extraídas en las zonas afectadas por el corte de una chapa de acero S460M de 15 mm de espesor. Los cortes se realizan tanto por láser como por plasma y oxicorte. Se extraen miniprobetas de tracción a diferentes distancias del borde de corte, determinándose cómo varía el límite elástico, la carga de rotura, alargamiento, índice de endurecimiento en función de la profundidad y las diferentes técnicas de corte. Se comparan las profundidades afectadas por el corte y su relación con la microestructura y microdurezas.

**PALABRAS CLAVE:** Zona afectada por un corte, Micro-ensayos, Planchas de acero.

### ABSTRACT

Mini-tensile tests results are presented. Mini-tensile probes are extracted from Cut Heat-Affected Zones from the cut edge a S460M steel plate with a thickness of 15 mm. Cuts were done by laser beam, plasma arc and oxy-fuel. Mini-tensile test-piece were extracted at different distances from the cut edge. Yield stress, ultimate tensile strength, elongation, hardening index were obtained vs. distance from cut edge for the different thermal cutting techniques. Comparisons are made of the depth of Cut Heat-Affected Zones and their relation with microstructure and microhardness measurements.

**KEYWORDS:** Cut Heat-Affected Zone, Micro-tests, Steel plates.

## 1. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de las planchas de acero laminadas en calientes se cortan para formar elementos estructurales. Estos elementos se sueldan a otros, se fijan mediante uniones mecánicas o no necesitan ningún otro proceso. Para planchas de 15 mm de espesor, la técnica de corte es siempre térmica: mediante una antorcha de plasma, un haz láser o una llama de oxicorte (el cizallado de planchas de este espesor es poco viable). Estos cortes aumentan la temperatura, en la zona de corte, hasta derretir el material; lo que afecta a la microestructuras de las zonas próximas al corte (CHAZ).

Este trabajo se encuadra dentro de las investigaciones realizadas dentro de un proyecto europeo (*Research Fund for Steel and Coal: HIPERCUT*). Dentro de este proyecto se pretende determinar las posteriores prestaciones de los bordes cortados en aplicaciones con cargas alternadas.

## 2. MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En este trabajo se examinan tres alternativas (plasma, láser y oxicorte) para el corte térmico de una chapa de acero de 15 mm de espesor y una resistencia media (S460M). Su composición química y carbono equivalente se recogen en la Tabla 1. Su microestructura, de ferrita y perlita bandeada, se muestra (atacada con nital al 2%) en la Fig. 1 (tomada de [1]) en diferentes secciones.

Tabla 1. Composición química del acero S460M.

Elemento	% en peso	Elemento	% en peso	Elemento	% en peso
C	0.12	Cr	0.062	Nb	0.036
Si	0.45	Mo	0.001	N	0.005
Mn	1.49	Ni	0.016	Sn	0.002
P	0.012	Al	0.048	Ti	0.003
S	0.001	Cu	0.011	V	0.066
				C Equiv.	0.39

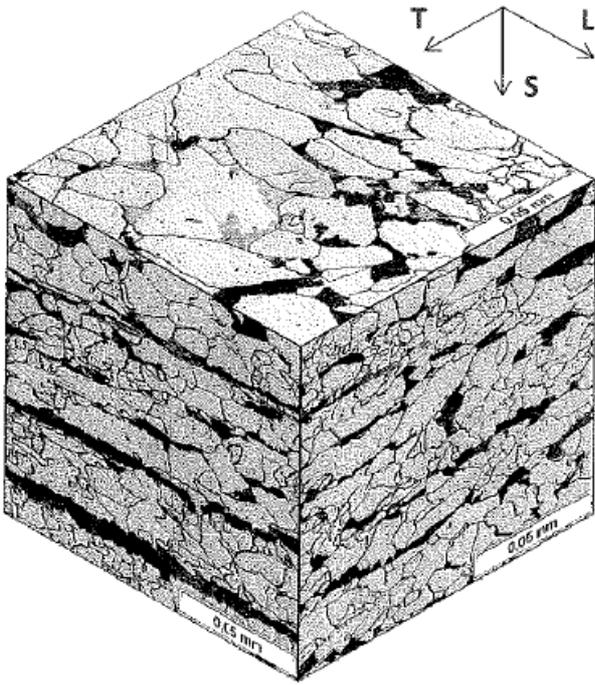


Figura 1. Microestructura del acero S460M atacado con nital al 2%.

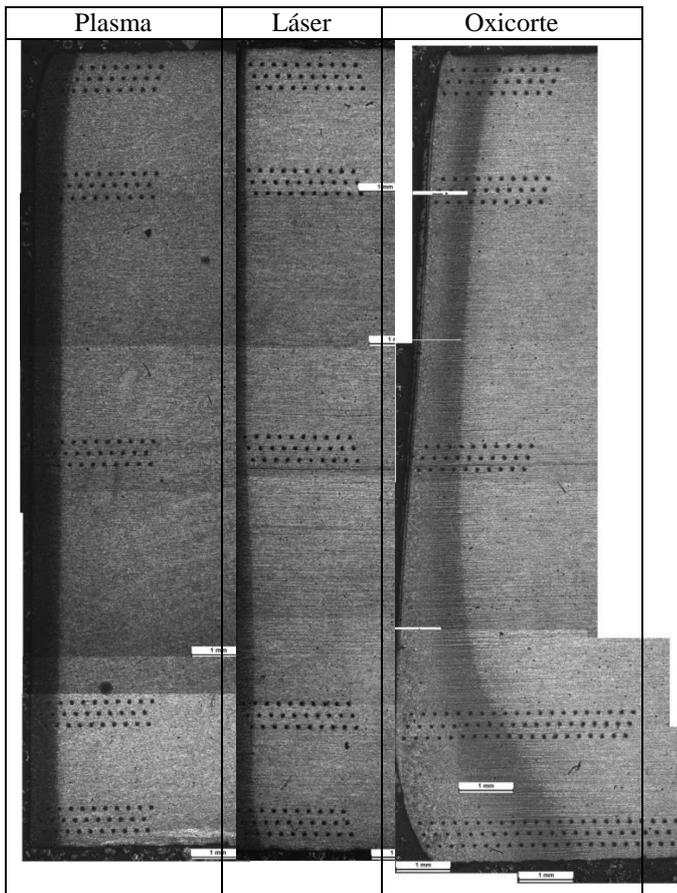


Figura 2. Extensión de las diferentes zonas afectadas por el calor del corte, reveladas con un ataque con nital.

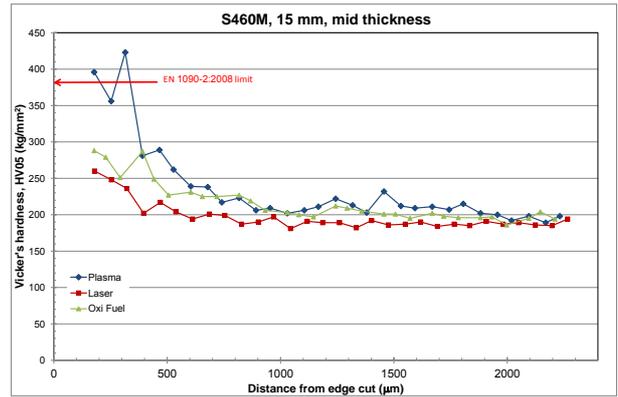


Figura 3. Dureza (Vickers, 0.5 kg) frente a la distancia a los bordes de corte, para las diferentes técnicas de corte (Láser, Plasma y Oxicorte).

La Fig.2 muestra la profundidad de las zonas afectadas por el calor generado en el proceso de corte térmico para el corte con chorro de plasma, haz láser y oxicorte. La Fig. 2 muestra también las líneas de indentaciones Vickers realizadas para la medida de la dureza frente a la distancia al borde de corte.

Para la realización de los perfiles de dureza, se realizaron medidas de durezas con un indentador Vickers y una carga de 0.5 kg. La Fig. 3 muestra los

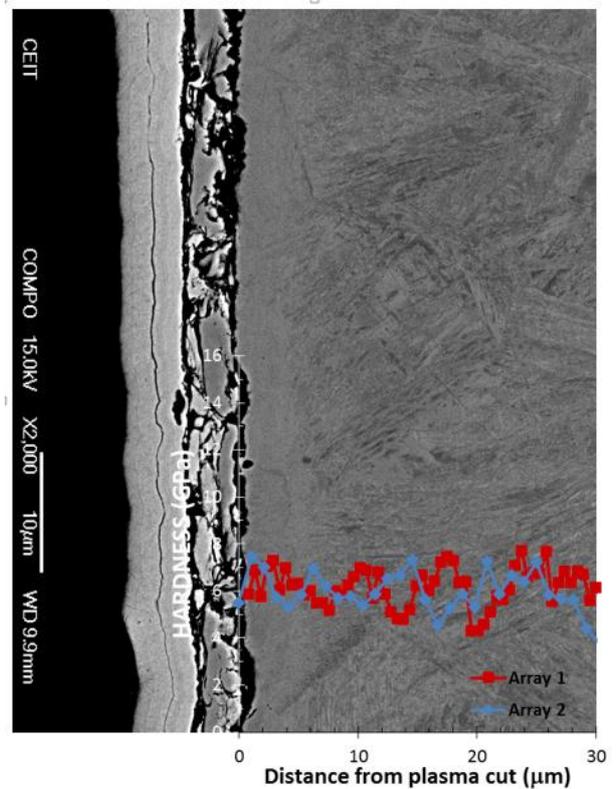


Figura 4. Microestructura y medidas de nanodurezas del borde de corte producido por el corte con plasma. Se observa, de izquierda a derecha, la baquelita usada para engastar la muestra, una capa de níquel (empleada para proteger la capa de óxidos), los óxidos y el acero.

perfiles de dureza para los 3 tipos de corte estudiados (plasma, láser y oxicorte) frente a la profundidad dentro de la chapa, para perfiles realizados en el centro del espesor de la chapa.

En el caso del corte que proporciona una mayor dureza (con plasma), la Fig. 4 muestra cómo la dureza se satura en los primeros micrómetros, más próximos al borde de corte. También se observa que no existe una capa amorfa próxima al corte (la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente elevada). Sin embargo se observa una capa algo más clara, que consiste en una capa nano-estructurada de unas 5  $\mu\text{m}$  de profundidad.

Las rugosidades superficiales son muy diferentes entre unas y otras técnicas de corte. El corte con plasma es el que deja una superficie más suave (dejando un pequeño ángulo, falta de perpendicularidad a uno de los dos lados del corte),  $R_{z5} = 9.4 \mu\text{m}$ . El oxicorte es el que produce una peor calidad del corte ( $R_{z5} = 23.7 \mu\text{m}$ ) y el láser tiene una calidad intermedia ( $R_{z5} = 38.3 \mu\text{m}$ ) entre el plasma y el oxicorte, presentando un dentado muy característico en el lado de incidencia del haz, como se observa en la Fig. 5 b).

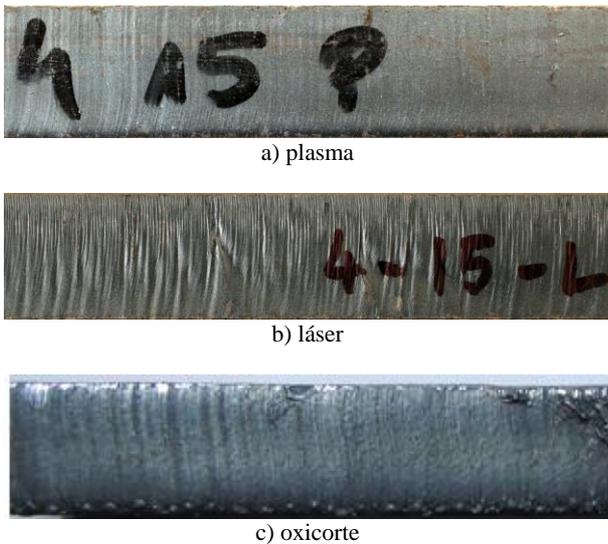


Figura 5. Aspecto superficial del corte de la chapa, de 15 mm de espesor, a) por plasma, b) láser y c) oxicorte.

Se extrajeron mini-probetas de tracción para caracterizar el comportamiento mecánico del material a las diferentes profundidades y microestructuras de las zonas afectadas por el calor del corte. El procedimiento para la extracción de miniprobetas de tracción a diferentes profundidades desde la superficie del corte (de unas 200  $\mu\text{m}$  de espesor cada una) mediante electroerosión por hilo, se encuentra detallado en las referencias [2-3].

Para la medida de la deformación durante el ensayo de tracción, se adhiere a la superficie de la probeta, en la zona rebajada, una banda extensométrica (HBM 1-LY-11-3/120), como muestra la Fig. 6.

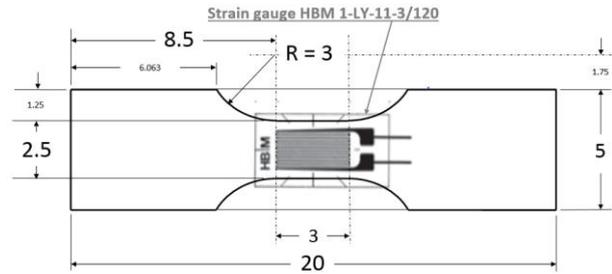


Figura 6. Dimensiones de la mini-probeta de tracción y su instrumentación con una banda extensométrica.

La carga que soporta la banda extensométrica deberá restarse de la carga total medida por la celda de carga para obtener la carga (y tensión) soportada por la sección de la probeta. Para determinar la carga soportada por la banda extensométrica se realiza un ensayo en el que se ensayan dos medias probetas unidas tan solo por la banda extensométrica, véase el inserto de la Fig. 5. A cada nivel de deformación ingenieril le corresponde una fuerza transmitida por la banda extensométrica.

La Fig. 7 también muestra el límite de medida de la banda extensométrica elegida (5%). Se selecciona una banda extensométrica con muy poco “recorrido” para poder precisar con mayor resolución el valor del límite elástico del material (convencionalmente / ingenierilmente se define al 0,2% de deformación permanente). A partir de este valor del 5%, el amplificador de la banda extensométrica se satura y la deformación deberá estimarse a partir de una correlación con la posición del actuador (que es lineal con el tiempo de ensayo).

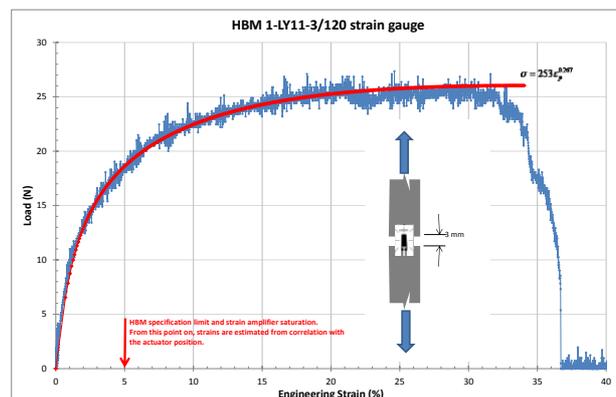


Figura 7. Ensayo de tracción de la banda extensométrica.

La Fig. 8 muestra un ensayo en el que la banda extensométrica se despegó durante el ensayo. Como es obvio, la carga transmitida por la banda extensométrica se sustrae de la carga total hasta el momento en el que ésta se despegó (en la figura de ejemplo, con un alargamiento del 0.2 mm). A partir de ese momento, toda la carga es soportada por la sección de la miniprobeta. La curva verde muestra la estimación de la carga soportada por la probeta.

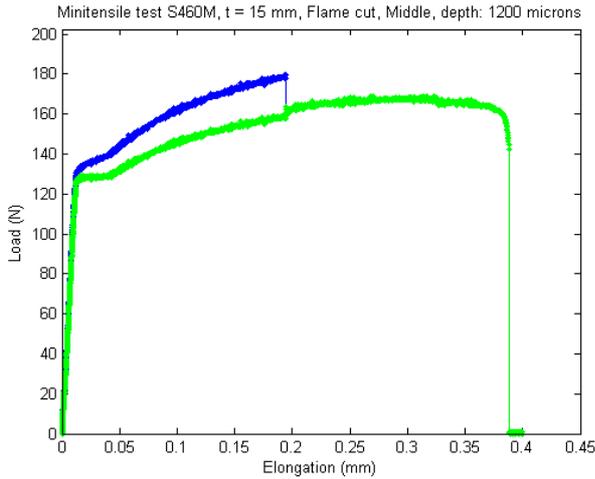


Figura 8. Registro carga frente al alargamiento de una miniprobeta de tracción en el que se observa cómo la banda extensométrica se desprende y cómo se sustrae la carga soportada por la banda extensométrica.

La medida de las tensiones residuales se realiza mediante difracción de rayos X (Phillips), con un ánodo de Cu y la técnica ángulo rasante. Se determinan las tensiones longitudinales y transversales cortas (en la dirección del espesor de la plancha). Para la medida de las tensiones en función de la profundidad, se elimina y electro-pule, hasta diferentes profundidades; posteriormente las tensiones se deconvolucionan matemáticamente; a partir de las tensiones medidas, se obtienen las originales, corrigiendo la relajación por la capa eliminada:

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + 2 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z_1)}{z} dz - 6z_1 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z_1)}{z^2} dz \quad (1)$$

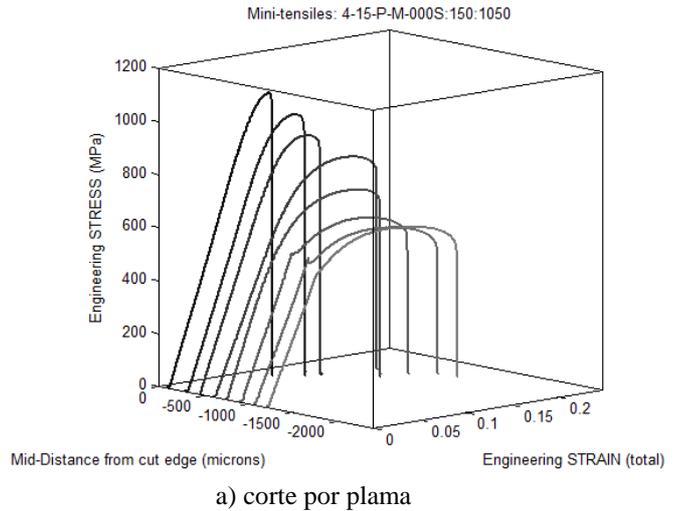
En donde  $H$  representa el espesor inicial de la muestra,  $z_1$  el espesor actual y  $\sigma_m$  la tensión medida correspondiente a ese espesor.

### 3. RESULTADOS

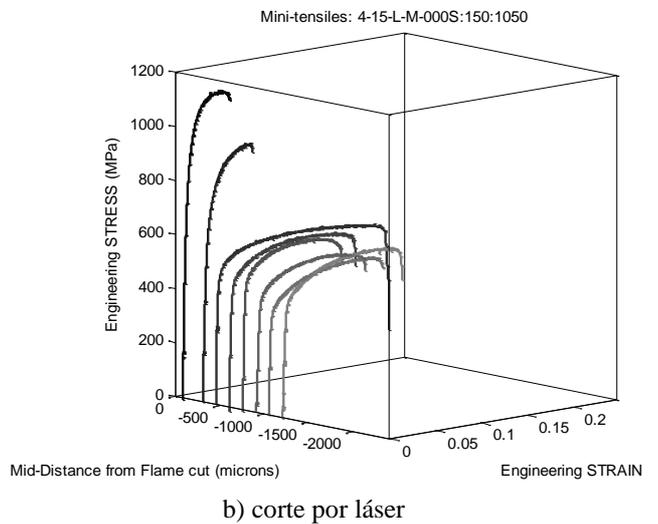
El material base (S460M, lejos de la zona de corte y en dirección longitudinal) presenta un límite elástico de 484 MPa, una carga de rotura de 594 MPa y un alargamiento de 14.4%.

La Fig. 9 muestra los registros obtenidos de los mini-ensayos de tracción, ordenados por tipo de corte (plasma, láser y oxicorte) para las diferentes distancias al borde de corte. Las miniprobetas son longitudinales y se extraen de la mitad del espesor de la chapa (de 15 mm).

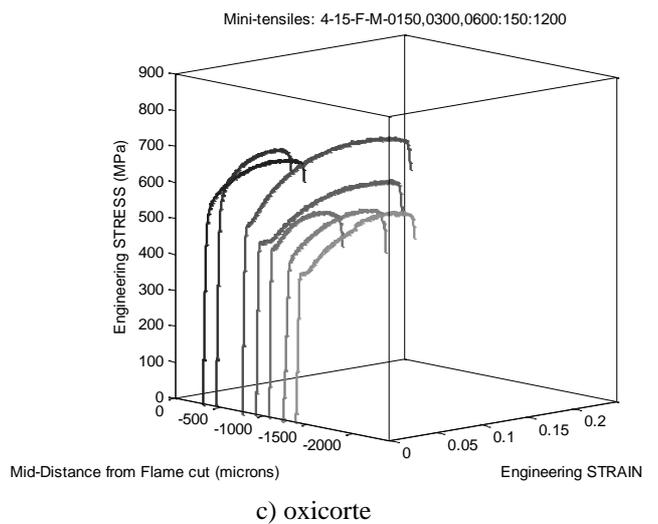
La Fig. 10 muestra en función del tipo de corte (plasma, láser y oxicorte) la evolución frente a la profundidad dentro del material del límite elástico. La Fig. 11 muestra la evolución de la carga de rotura. La Fig. 12 muestra la deformación uniforme; la Fig. 13 muestra la



a) corte por plasma



b) corte por láser



c) oxicorte

Figura 9. Tensión ingenieril frente a la deformación ingenieril, en función de la distancia al corte a) por plasma, b) láser y c) oxicortado.

deformación a fractura y, por último, la Fig. 14 representa la evolución del índice de endurecimiento del material (de acuerdo con un ajuste del comportamiento tensión-deformación a una ecuación de Hollomon).

#### 4. DISCUSIÓN

La ZAC del corte es más delgada para el corte por láser y plasma. La mayor extensión de la ZAC ocurre para el oxicorte, y –en particular– en la zona de salida de la escoria donde se extiende varios milímetros.

El corte por láser produce mayores durezas que los cortes por plasma y oxicorte. Esto se debe a la mayor densidad de energía aportada y a una mayor velocidad de enfriamiento por (auto-) temple que se produce. Aunque se excede el límite de dureza permisible, fijado por la norma europea EN 1090-2-2008 ( $380 \text{ kg/mm}^2$ ), todas las probetas superaron las pruebas de doblado sin agrietamiento alguno.

Todas las tensiones residuales son compresivas en las superficies de los cortes, como se observa en la Fig. 15. Anticipando una mejora en la vida a fatiga de los bordes de corte (su eliminación, en consecuencia, resultaría perjudicial para su vida a fatiga y, sin duda, económicamente más gravosa). El comportamiento a fatiga de los diferentes bordes de corte se detalla en la referencia [4].

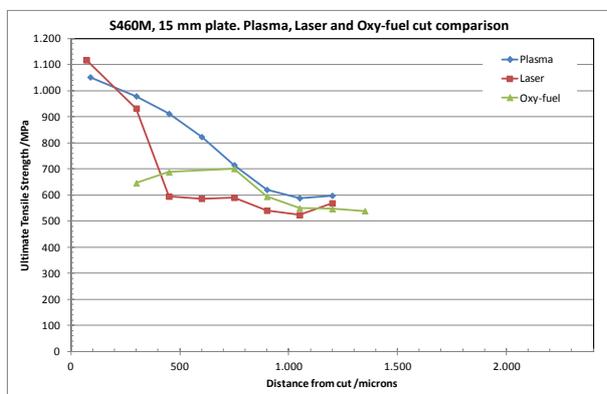


Figura 10. Evolución del límite elástico en función de la técnica de corte, frente a la distancia al corte.

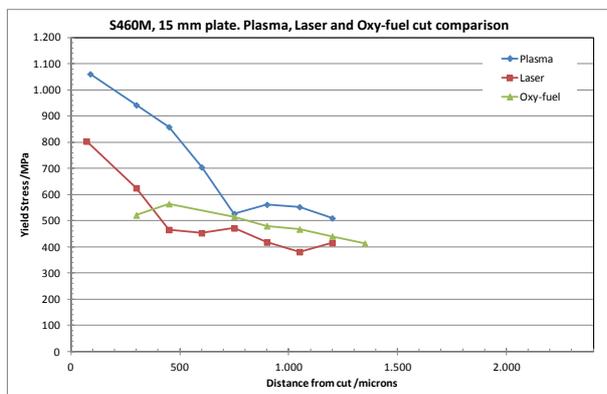


Figura 11. Evolución de la carga de rotura en función de la técnica de corte, frente a la distancia al corte.

#### 5. CONCLUSIONES

1. Los cortes por plasma proporcionan una calidad superior del corte en comparación con el corte por haz láser o con una antorcha de oxicorte.
2. El corte por plasma deja un lado con un corte recto (que deberá ser el de la pieza) y otro oblicuo (que debería corresponder con la pedacería). Se controla modificando el sentido del corte.
3. La dureza superficial del corte con plasma puede exceder ligeramente los requisitos impuestos por las normas (EN 1090-2-2008), pero no se aprecia agrietamiento en el doblado; por lo que debería revisarse este límite para los cortes con plasma.
4. En prácticamente todos los escenarios que puedan contemplarse, el corte por plasma es más económico que el corte por láser.
5. El corte con láser produce un dentado regular en el lado de incidencia del haz. Tampoco es posible cortar espesores superiores a los 15 mm, con una calidad razonable.
6. El oxicorte produce unas amplias zonas afectadas por el calor, lo que supone un revenido del material subyacente y, en general, mejora sus características mecánicas.
7. La eliminación de los bordes de corte elimina las compresiones residuales producidas por los tres métodos de corte térmico estudiados, por lo que debería evitarse. No se recomienda; preferiblemente deberán respetarse los bordes de corte tal como quedan.
8. Todas las medidas de la zona afectada por el calor del corte son, en todos los casos, coherentes entre sí. La metalografía muestra diferentes fases a diferentes profundidades del corte, lo que se ve reflejado en diferentes durezas y diferentes comportamientos mecánicos.
9. El mejor procedimiento de corte, desde el punto de vista de las tensiones residuales es el oxicorte que introduce unas elevadas compresiones residuales que se extienden en el interior del material a lo largo de varios centenares de micrómetros.
10. El peor, desde el punto de vista de las tensiones residuales, es el corte por haz de láser, que introduce unas compresiones residuales mucho más pequeñas.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida de la Unión Europea a través del proyecto HIPERCUT (RFSC-CT-2012-00027).

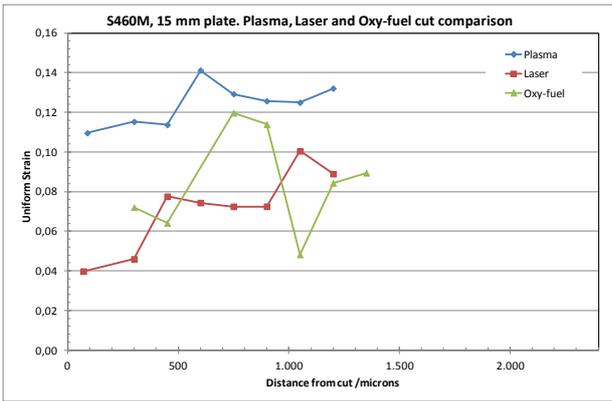


Figura 12. Evolución de la deformación uniforme en función de la técnica de corte, frente a la distancia al corte.

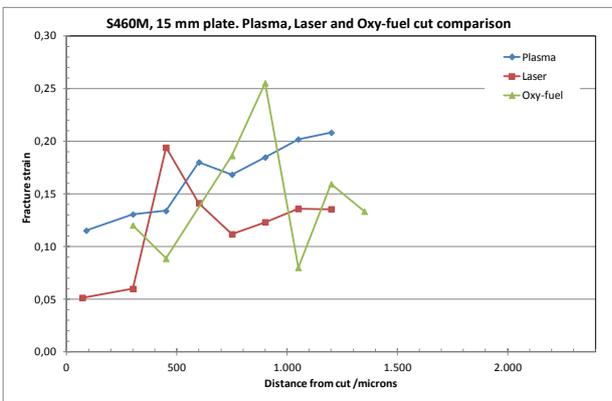


Figura 13. Evolución de alargamiento (a fractura) en función de la técnica de corte, frente a la distancia al corte.

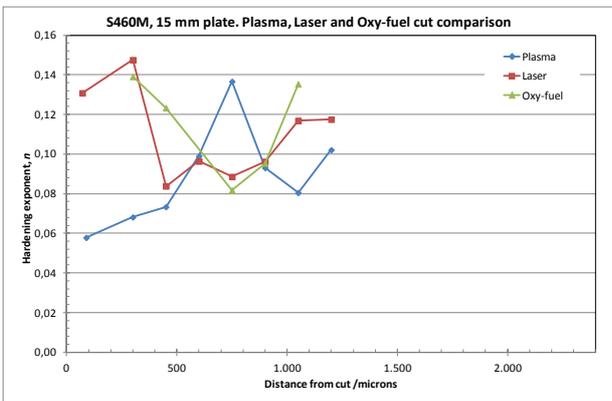


Figura 14. Evolución del índice de endurecimiento en función de la técnica de corte, frente a la distancia al corte.

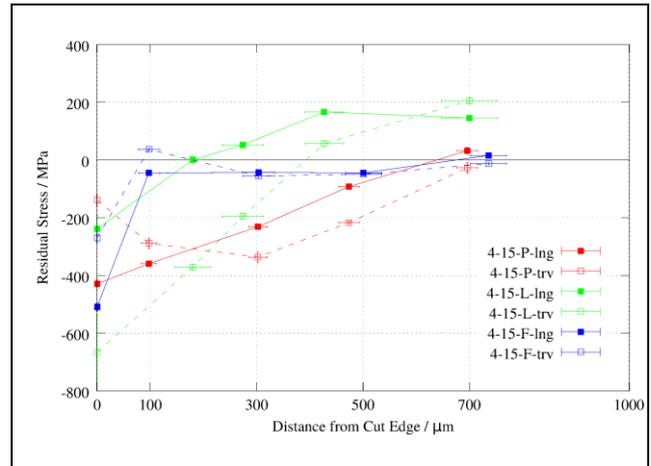


Figura 15. Evolución de las tensiones residuales en función de la distancia al borde cortado, para las diferentes formas de corte (plasma (P), Láser (L) y oxicorte (F)). Símbolos rellenos para las tensiones longitudinales y vacíos para la orientación transversal.

## REFERENCIAS

- [1] T.P. García Pemán. Comportamiento en fatiga de componentes estructurales obtenidos mediante oxicorte, corte por plasma y corte por láser: comparativa y definición de curvas S-N de diseño. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, 2015.
- [2] A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal, J.L. Pedrejón, S. Moreno. Caracterización de la Zona Afectada por un Oxicorte, *Anales de Mecánica de la Fractura* **31** (2014) 595-600.
- [3] J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso, S. Cicero, A. Klimpel, A. Bannister. Ductilidad y tenacidad de un borde de cortado por plasma en una chapa de acero S460M de 15 mm de espesor, *Anales de Mecánica de la Fractura* **32** (2015) 569-574.
- [4] S. Cicero, T. García, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso, A. Bannister, A. Klimpel. Definition of BS7608 fatigue classes for structural steels with thermally cut edges, *J. of Construction Steel Research* **120** (2016) 221-231.