

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FALLO DE SOLDADURAS LÁSER AUTÓGENAS A TOPE Y EN ESQUINA PARA UNIONES EN PROLONGACIÓN DE LÁMINAS DE ACERO SOLAPADAS

M. Iordachescu^{1*}, A. Valiente^{1*}, M. de Abreu¹, P. Santos²

¹Departamento de Ciencia de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren 6, 28040 Madrid-España

²Departamento de Física Aplicada e Ingeniería de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid-España

* Persona de contacto: andres.valiente@upm.es

RESUMEN

La investigación presentada en este trabajo evalúa y compara la deformabilidad y la resistencia a tracción de uniones solapadas de láminas o chapas delgadas de aceros diferentes mediante soldadura láser autógena disímil, integradas con función estructural en la fabricación industrial en cadena. Las dos variantes de unión en cuanto a configuración (a tope y en esquina) han sido sometidas a ensayo de tracción hasta rotura con medida de elongación en las diferentes zonas de interés (metales base, zonas térmicamente afectadas y soldaduras) mediante video-extensometría digital computerizada. Los ensayos demuestran que los dos tipos de unión se comportan como rótulas con resistencia interna de capacidad portante similar y diferencias significativas de ductilidad, y los posteriores análisis fractográficos revelan dónde radican las debilidades respectivas y explican su origen en relación con la microestructura.

PALABRAS CLAVE: Soldadura láser, Fractura, Mecanismos de fallo

ABSTRACT

This paper addresses the assessment and comparison concerning the deformation and tensile strength of overlap welded joints made with a structural capacity by autogenous laser welding between thin steel sheets made from different steels. The two possible joining options in terms of configuration (butt and corner) were subjected to tensile testing to failure, with elongation measured in different areas of interest (base metals, heat-affected zones, and welds) using computerized digital video-extensometry. The tests demonstrate that the two joint types behave as hinges with similar internal strength and load-bearing capacity, but significant differences in ductility. Subsequent fractographic analyses reveal the respective weaknesses and explain their origin in relation to the microstructure.

KEYWORDS: Laser welding, Fracture, Failure mechanisms

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura autógena láser forma parte del grupo de procesos de soldeo que se limita a fundir los metales a unir, sin requerir material añadido. Además, la aportación de calor involucrada en el proceso es muy baja comparada con la de otros procedimientos, lo que propicia la formación de zonas térmicamente afectadas (HAZ) muy estrechas y minimiza los cambios microestructurales y la distorsión del metal contiguo [1-3]. La rapidez con que tiene lugar el enfriamiento da lugar a microestructuras de grano fino que mejoran la resistencia mecánica de la unión soldada, si bien pueden perjudicar la ductilidad [4-6]. Estas características proporcionan a la soldadura autógena láser ventajas considerables para ser empleada como medio de unión de

chapas delgadas dotado de capacidad resistente. Si a ello se une la estética de su acabado y su facilidad para ser integrada en procesos de fabricación en cadena, se explica que haya adquirido un gran valor para industrias como la automoción, la aeronáutica o la microelectrónica [7].

La soldadura autógena láser permite unir láminas muy delgadas, con espesores de sólo tres décimas de milímetro, y puede utilizarse con una gama de materiales metálicos que incluye aceros al carbono, aceros inoxidables y aleaciones de magnesio. También puede aplicarse para realizar soldaduras disímiles, es decir, para unir chapas de distintos materiales. A pesar de los avances experimentados por la tecnología de la soldadura, la diferencia de composición química y de

comportamiento térmico de los metales base no ha permitido hallar una solución plenamente satisfactoria para las uniones disímiles, ya que sus respectivas respuestas mecánica y metalúrgica al proceso de fusión originado por el soldeo son muy distintas.

Las láminas a unir por soldadura láser se superponen solapando los extremos cuya continuidad se pretende, y la soldadura se genera bien entre las caras en contacto de las láminas (unión a tope) o bien ente la cara de una de ellas y el borde final de la otra (unión en esquina). Ambos tipos de unión son objeto de este trabajo.

La investigación aquí descrita tiene como objetivo determinar experimentalmente y comparar el comportamiento mecánico hasta rotura de los dos tipos de unión láser de láminas delgadas indicadas en uniones disímiles de aceros comerciales. Para ello se han llevado a cabo ensayos de tracción de dichas uniones instrumentados con el sistema de video-extensometría digital computerizada VIC-2D [8], que proporciona los valores en superficie de los campos de desplazamientos y deformaciones de las probetas a lo largo del ensayo. Los ensayos se han complementado con el análisis metalúrgico y fractográfico de las probetas mediante microscopía SEM.

2. MATERIALES

Las láminas empleadas para la experimentación eran de 0,5 mm de espesor y fueron suministradas como chapas rectangulares planas de 150 × 300 mm². Los aceros respectivamente empleados para fabricarlas, EN 1.0330 y EN 1.4307, esto es, acero al carbono y acero inoxidable austenítico tienen límites elásticos similares. Las tablas 1 y 2 indican la composición química y las propiedades mecánicas de cada uno.

Tabla 1. Composición química de los aceros empleados en la experimentación.

Acero	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni
EN 1.0330	0,12	0,55	0,03	-	0,02	-
EN 1.4307	0,03	1,98	1,00	19,45	-	10,48
Acero	S	P	N	Al	Fe	
EN 1.0330	0,045	0,03	0,008	0,02	bal.	
EN 1.4307	0,015	0,045	0,10	-	bal.	

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros empleados en la experimentación.

Acero	Módulo de elasticidad (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Máxima elongación uniforme
EN 1.0330 (CS)	197	302	419	20 %
EN 1.4307 (SS)	202	330	684	66 %

Las soldaduras han sido realizadas en el Centro Láser de la Universidad Politécnica de Madrid con el equipo de que éste dispone YAG láser modelo DY 033, fabricado por la empresa Rofin Sinair en Hamburgo (Alemania). Las variables de soldeo fueron optimizadas efectuando pruebas de ajuste dirigidas a asegurar la penetración total y la ausencia de defectos con una sola pasada del haz láser. Para crear la atmósfera de protección se empleó gas argón. Los valores finalmente adoptados pueden verse en la tabla 3. La figura 1 muestra sendos esquemas de las dos configuraciones de soldadura y de los procesos de soldeo.

Tabla 3. Variable de soldeo láser adoptadas para la fabricación de probetas.

Unión	Díametro del haz (mm)	Potencia (W)	Velocidad de soldeo (mm/s)	Caudal de argón (litros/minuto)	Angulo de incidencia del haz (°)
A tope	0,50	900	20	15	5
En esquina	0,55	1000	25	15	5

En ambos casos la lámina de mayor conductividad térmica (la de acero al carbono) ocupó la posición de incidencia del haz láser. Las longitudes de los extremos libres de las láminas (las dos de la unión a tope y la de acero inoxidable de la unión en esquina) garantizaban que sus respectivos movimientos de sólido rígido pudieran ser observados y cuantificados a la largo del ensayo.

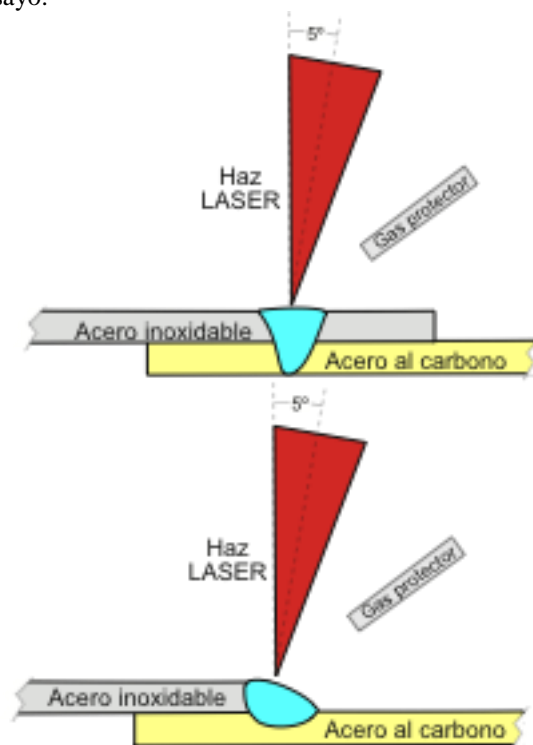


Figura 1. Configuraciones de soldadura láser: a tope (arriba) y en esquina (abajo).

En la figura 2 puede verse la sección transversal de ambas uniones soldadas.

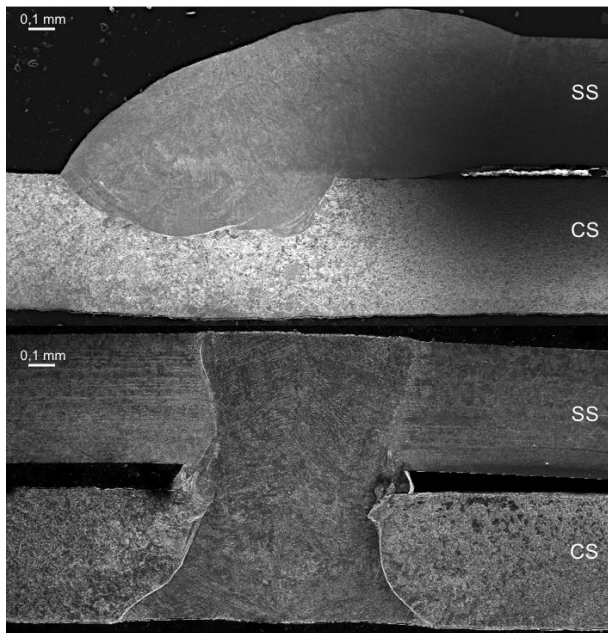


Figura 2. Secciones transversales de las uniones disímiles (CS: acero al carbono; SS: acero inoxidable) soldadas con láser en esquina (arriba) y a tope (abajo).

Las microestructuras existentes de izquierda a derecha en la unión a tope, a la altura de la lámina CS, empiezan por la del acero en estado de recepción, de grano ferrítico-perlítico fino levemente deformado en la dirección de laminación, siguen con la de transición a la zona térmicamente afectada del lado CS (ZAT-CS), consistente en estructuras de Widmanstätten de grano grueso que se originan en la transformación parcial de la austenita en ferrita, y finalmente dan paso a la zona de fusión, compuesta por plaquetas de martensita en la matriz austenítica donde se han desarrollado desde la línea de fusión por enfriamiento rápido. La estrecha franja que delimita dicha zona es el frente de solidificación del baño líquido creado por el haz láser.

También en la unión a tope, a la altura de la lámina SS, de derecha a izquierda, la microestructura empieza por la del acero en estado de recepción, con granos sin dirección preferente de crecimiento y maclas de austenita recocida, siguen con la de transición a la zona térmicamente afectada correspondiente (ZAT-SS), consistente en granos alargados de ferrita primaria repartidos en una matriz de austenita interdendrítica, y concluyen con la de la zona de fusión anteriormente descrita.

En la unión en esquina, recorrida a la altura de la lámina CS de izquierda a derecha, la microestructura del acero en estado de recepción también da paso a una de Widmanstätten de grano grueso dentro de la zona térmicamente afectada ZAT-CS, hasta terminar en la zona de fusión. A la altura de la lámina SS, en sentido de derecha a izquierda, a la microestructura del acero SS en estado de recepción le sucede otra dendrítica columnar de ferrita y austenita, hasta la zona térmicamente afectada ZAT-SS, formada por una matriz austenítica

ca con una fase dispersa de ferritas alargadas.

La figura 3 muestra los campos de microdureza Vickers 0.1 medidos por indentación en ambas uniones soldadas, a lo largo de una trayectoria que recorre los planos medios del lado de carga de las láminas y los enlaza a través de la soldadura que las une. El crecimiento que experimenta la dureza desde los metales base a la región de soldadura es notorio en ambas uniones, pero significativamente mayor en la unión a tope. Por el contrario, la anchura de dicha región es significativamente menor. Ambos efectos son consecuentes con la acción más concentrada del haz láser que la configuración geométrica propicia en la unión a tope.

3. ENSAYOS MECÁNICOS

Las chapas soldadas descritas fueron mecanizadas hasta transformarlas en probetas planas de tracción de 37 mm de fuste y $0,5 \times 6 \text{ mm}^2$ de sección transversal, con la soldadura láser ocupando el centro de éste. Dos ensanchamientos de 9 mm con sus transiciones correspondientes prolongaban el fuste 19 mm más por cada extremo para hacer la función de cabezas de sujeción. Se construyeron y ensayaron tres probetas de cada tipo de soldadura.

Los esquemas mostrados en la figura 4 ilustran los dispositivos empleados para someter las probetas a carga creciente de tracción F hasta rotura. Como puede verse, el contacto entre una de las caras de la probeta y las correspondientes de las mordazas de sujeción de la máquina de ensayos no es directo por haberse introducido entre ambas superficies sendos espaciadores del mismo espesor que las láminas. La finalidad de esta medida era asegurar que la línea de acción de las dos fuerzas iguales y opuestas ejercidas por la máquina sobre los extremos de la probeta estuviese contenida en la otra cara de ésta durante todo el ensayo.

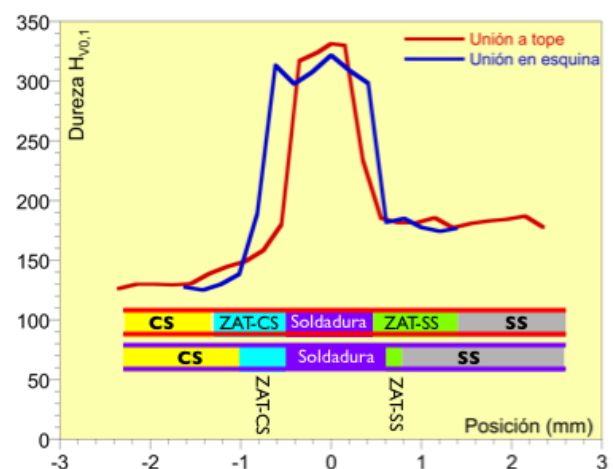


Figura 3. Campos de microdureza Vickers en las uniones disímiles de acero al carbono y acero inoxidable soldadas con láser a tope y en esquina.

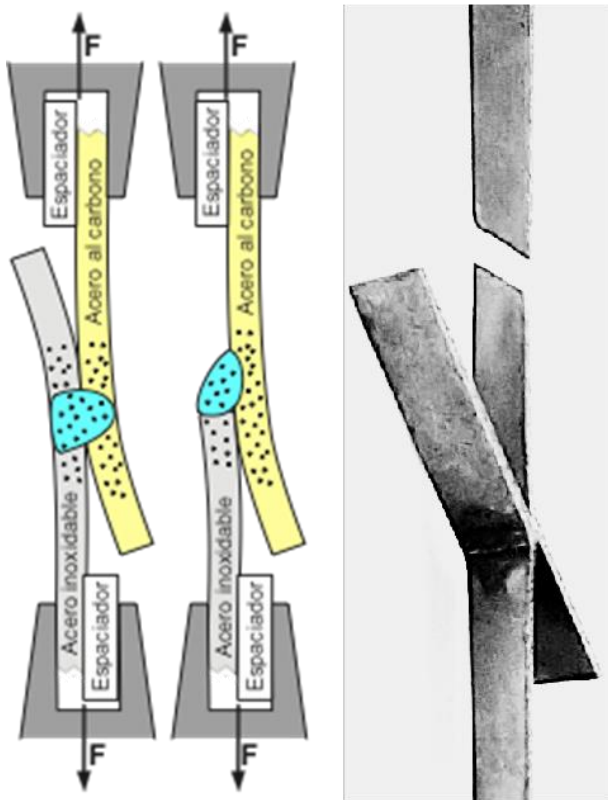


Figura 4. Dispositivo del ensayo de tracción de probetas con uniones soldadas láser a tope y en esquina, e imagen final de una de ellas.

El recubrimiento de pintura moteada depositado sobre uno de los cantos de la probeta para aplicar el sistema de medidas extensométricas VIC-2D también aparece esquematizado en la figura 4. El software del sistema procesa la sucesión de imágenes digitales de dichos cantos tomadas a lo largo del ensayo, identificando las motas como puntos materiales por su composición de grises y ubicando sus posiciones relativas a través de las que ocupan los píxeles activados por cada una. Los campos de desplazamientos quedan registrados digitalmente para obtener elongaciones y deformaciones en la superficie de la probeta.

Los esquemas de la figura 4 ilustran el proceso de deformación que experimentan las dos uniones soldadas a medida que aumenta la carga aplicada. Las caras de las láminas en contacto con los espaciadores permanecen sobre la línea de carga al alejarse de la soldadura, mientras los extremos libres giran sin deformarse. Se han realizado tres ensayos de cada unión soldada, comprobándose que ambas uniones se comportan como rótulas con resistencia interna, cuyo giro determinan los extremos libres haciendo las veces de brazos de un goniómetro. Este tipo de comportamiento ha sido tenido en cuenta para justificar la existencia de momentos flectores generados por la carga de tracción actuando sobre las zonas térmicamente afectadas [8].

La figura 5 muestra las imágenes de una unión de cada tipo a diferentes niveles de carga, el último de los cuales es la carga máxima alcanzada en el ensayo y causante del fallo

de la unión. En todos los casos éste ha tenido lugar por agotamiento plástico y estricción de la lámina de acero al carbono, conforme a la condición canónica de no ser la soldadura más débil que los componentes unidos.

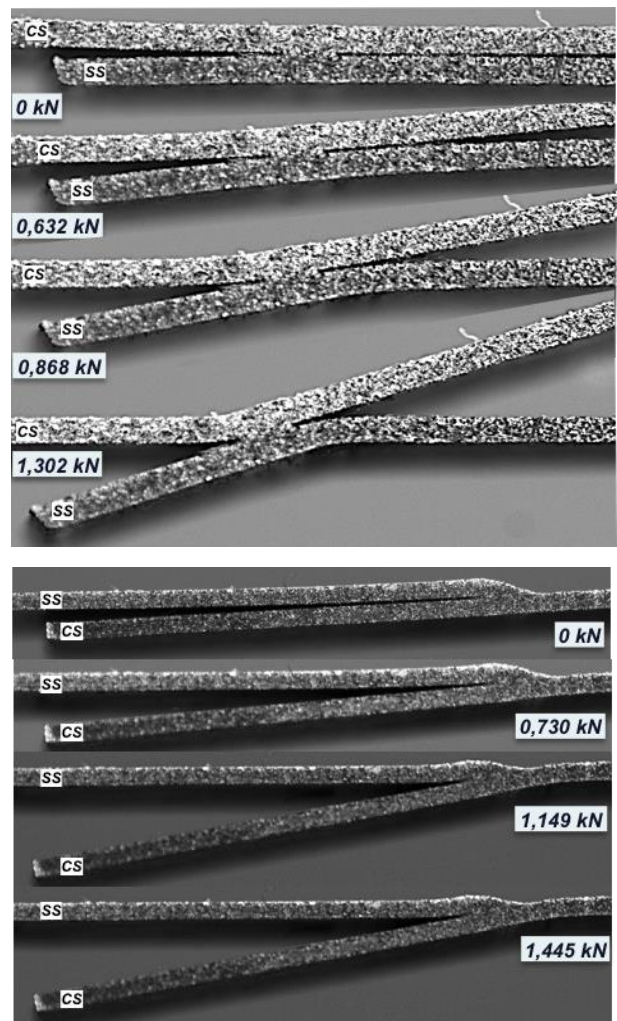


Figura 5. Imágenes de las uniones soldadas disímiles a tope (arriba) y en esquina (abajo) bajo distintos niveles de carga en el ensayo de tracción.

En la figura 6 se ha representado la carga aplicada en el ensayo de una unión a tope frente a las elongaciones medidas con el sistema VIC sobre cuatro extensómetros virtuales de 1 mm de base de medida ubicados paralelamente a la línea de carga en las posiciones también indicadas en la figura, es decir, sobre los dos metales base, el ligamento de unión de las láminas y la zona térmicamente afectada del acero al carbono. Junto a estas cuatro curvas se han representado las curvas análogas de las dos láminas sometidas a tracción simple, deducidas de su sección transversal y de las curvas tensión-deformación de los dos aceros. Como era de esperar la coincidencia de estas últimas con las respectivas de los extensómetros E3 y E4 es plena, destacando además la diferencia de endurecimiento que presenta la soldadura frente a los metales base, muy superior a la de la zona afectada térmicamente de la lámina de acero al carbono.

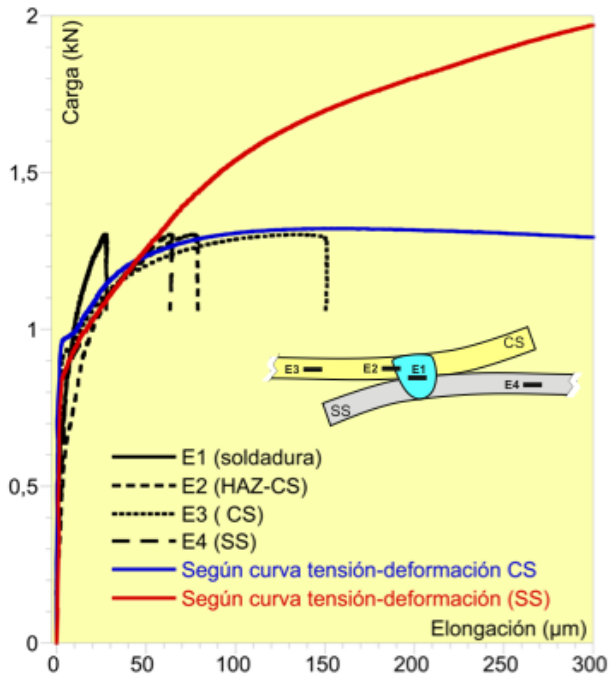


Figura 6. Curvas carga-elongación registradas con los extensómetros virtuales E1 a E4 en el ensayo de una unión soldada a tope

La carga de tracción F aplicada se ha representado en la figura 7 frente al ángulo Θ formado por el extremo libre de la probeta con la línea de carga para uno de los ensayos de cada unión. Los valores del ángulo Θ fueron medidos con ayuda del sistema VIC 2D, a partir de los desplazamientos relativos a la posición inicial experimentados por los extremos de un segmento material de 1 mm de longitud situado sobre el plano medio del lado de lámina libre de carga.

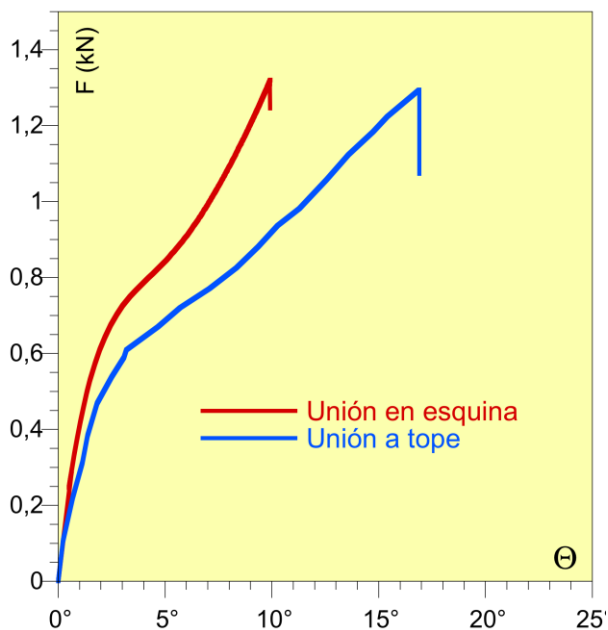


Figura 7. Ensayos de tracción de las uniones soldadas disímiles a tope y en esquina: carga aplicada frente a rotación experimentada

Como puede verse, el comportamiento tipo rótula tiene las mismas características cualitativas en los dos tipos de unión soldada, y sólo presenta diferencias cuantitativas entre ambos. El tramo inicial de las curvas $F-\Theta$ es lineal y da paso, con un codo suave de transición, a un segundo tramo también lineal de menor pendiente. Las dos soldaduras pierden rigidez al alcanzar un nivel de deformación muy similar (en torno a 3° de giro), si bien la unión en esquina es la más rígida en ambos tramos.

Tanto la resistencia de la unión a tope (1,30 kN) como la de la unión en esquina (1,32 kN) concuerdan perfectamente con el hecho de que la unión falle por agotamiento plástico y estricción de la lámina de acero al carbono, cuya capacidad portante, de acuerdo con sus dimensiones transversales nominales de $0,5 \times 6 \text{ mm}^2$ y la resistencia a tracción de la tabla 2, es de 1,26 kN.

Las curvas de la figura 7 permiten comparar el comportamiento mecánico previo a la rotura de las dos clases de unión disímil con soldadura láser estudiados, pero no ofrecen la descripción más apropiada del comportamiento tipo rótula que ambas exhiben, y que consistiría en una relación giro-momento, en lugar de giro-fuerza. Sin embargo, dado que la acción ejercida sobre las uniones para caracterizar su comportamiento son dos fuerzas iguales, opuestas y colineales, dicha relación sólo puede ser establecida a partir de la obtenida experimentalmente conociendo el centro de giro de la rótula equivalente a la unión soldada, pero el criterio a aplicar para ello no es único.

4. CONCLUSIONES

La finalidad de la investigación presentada era analizar y comparar en cuanto al comportamiento mecánico resultante dos modos de unir (a tope y en esquina) en prolongación con soldadura láser láminas solapadas de pequeño espesor y aceros diferentes, específicamente acero al carbono y acero inoxidable.

La primera analogía entre los dos tipos de unión se manifiesta en la microestructura. En la unión a tope, la soldadura es una mezcla de austenita y martensita propia de un acero inoxidable, con una morfología compleja consecuencia de la heterogeneidad de propiedades físicas, particularmente las térmicas, de los metales base. En la unión en esquina, el acero de cuya solidificación resulta la soldadura es acero inoxidable en un 80 %.

Las medidas del campo de durezas efectuadas en ambas uniones también muestran la misma analogía entre los dos tipos de unión, y en particular en las regiones de soldadura confirman mayor presencia del acero inoxidable. Asimismo, en las dos uniones la máxima dureza se registra en las zonas de fusión. La diferencia ya mencionada de propiedades físicas entre los dos aceros desempeña un papel determinante en el proceso de solidificación de dichas zonas de fusión.

El comportamiento mecánico global de las dos uniones al ser solicitadas a tracción también presenta una fuerte analogía, pudiendo describirse como el de una rótula con dos escalones de resistencia interna lineal. El giro que separa ambos escalones es de 5° en ambas uniones y la flexibilidad de la rótula disminuye del primero al segundo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda recibida a través del proyecto RTI-2018-097221-B-I00 financiado por MCIN/A EI/10.13039/501100011033 y “FEDER Una manera de hacer Europa” de la “Unión Europea”, así como por el proyecto PRE-2019-088263 financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y “FSE Invierte en tu futuro” de la “Unión Europea NextGenerationEU/ PRTR”.

REFERENCIAS

- [1] Iordachescu, D.; Blasco, M.; Lopez, R.; Cuesta, A.; Iordachescu, M.; Ocaña, J.L. Recent achievements and trends in laser welding of thin plates. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **2011**, *13*, 981–985.
- [2] Giudice, F.; Missori, S.; Scolaro, C.; Sili, A. A review on fusion welding of dissimilar ferritic/austenitic steels: Processing and weld zone metallurgy. *J. Manuf. Mater. Process.* **2024**, *8*, 96.
- [3] Giudice, F.; Missori, S.; Sili, A. Dissimilar welding of thick ferritic/austenitic steels plates using two simultaneous laser beams in a single pass. *J. Manuf. Mater. Process.* **2024**, *8*, 134.
- [4] Kumari, A.; Pandey, C. Autogenous laser-welded dissimilar joint of ferritic/martensitic P92 steel and Inconel 617 alloy: Mechanism, Microstructure, and Mechanical Properties. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* **2022**, *22(1)*, 39.
- [5] Iordachescu, D., Scutelnicu, E., Iordachescu, M., Valiente, A., Ruiz-Hervias, J., Ocaña, J.L. Specific properties of ferritic/austenitic dissimilar metals welded joints. *Weld. World* **2011**, *55(3-4)*, 2-11.
- [6] Kang, M., Jeon, I-H., Han, H.N., Kim, C. Tensile-shear Fracture Behavior Prediction of High-Strength Steel Laser Overlap Welds, *Metals* **2018**, *8*, 365.
- [7] Moskvitin, G.V.; Polyakov, A.N.; Birger, E.M. Application of laser welding methods in industrial production, *Weld. Int.* **2013**, *27*, 572-580.
- [8] Benasciutti, D. Lanzutti, A., Rupil, G., Fraenkel Haeberle, E., Microstructural and mechanical characterization of laser-welded lap joints with linear and circular beads in thin low carbon steel sheets, *Materials and Design*, **2014**, *62*, 205 -216