

Aplicación del láser de diodo para la soldadura en *tailored blanks*^(*)

J.L. Bocos*, F. Zubiri*, F. Garciandía*, J. Peña*, A. Cortiella*, J.M. Berrueta* y F. Zapiráin**

Resumen Uno de los puntos de mayor interés para la industria de la automoción, en los últimos años, es la reducción en peso del automóvil y conseguir, con ello, rebajar el consumo de combustible. Disminuir el peso del automóvil y mantener unas elevadas prestaciones implica, entre otras actuaciones, la utilización de materiales en la carrocería que posean una elevada resistencia mecánica. En este trabajo se presenta el estudio de la viabilidad de la utilización del láser de diodo para la soldadura de chapas de acero de alta resistencia; concretamente de aceros ferríticos microaleados (ZStE), DP (*dual phase*) y TRIP (*transformation induced plasticity*). Todos ellos, son materiales que pueden formar parte de *tailored blanks*, que se definen como piezas constituidas por la unión, mediante soldadura, de chapas de acero de distintas calidades y espesores. En este estudio se ha profundizado en la caracterización metalográfica de los cordones de soldadura y se ha analizado el comportamiento mecánico de las soldaduras obtenidas llevando a cabo ensayos de microdureza, embutición, tracción y fatiga.

Palabras clave Aceros de alta resistencia. Formatos a medida. Soldadura láser de diodo. Aceros TRIP. Tratamiento térmico post-soldadura.

Application of the diode laser for welding in *tailored blanks*

Abstract During the last years, one of the most interesting subjects in the automotive industry is the weight reduction of the automobile, and so to diminish the fuel consumption. Among other performances, the use in the body car of materials which have high mechanical resistance must be considered for the weight reduction of the automobile and maintaining high benefits. In this work, it has been studied the utilization of the diode laser for high resistance steel sheets welding, concretely microalloying steels (ZStE), DP "dual phase" and TRIP "transformation induced plasticity". These steels can be employed in "tailored blanks", which are defined as two or more separate pieces of flat material of dissimilar thickness and/or physical properties joined together before forming, to provide superior qualities in the finished stamped part. In this study, the metallographic characterization has been realised in the welding seams; and the mechanical behaviour has been analysed employing the following tests: microhardness, drawing, tensile and fatigue.

Keywords High strength steels. Tailored blanks. Diode laser welding. TRIP steels. Post-welding heat treatment.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de procesos *near net shape* en diferentes procesos de conformado metálico ha dado lugar a los *tailored blanks* o formatos a medida, que son preformas para estampación, constituidas por la unión mediante soldadura de chapas con diferente espesor y, a veces, de distinta calidad^[1]. Estas piezas se utilizan en la industria del automóvil desde hace apenas 15 años y su uso se ha incrementado de manera considerable, en este tiempo. Se prevé que, en un futuro cercano, el 50 % de la masa de la ca-

rocería del automóvil esté formada por *tailored blanks*^[2-4]. El empleo de estos formatos a medida permite reducir el peso y los costes de producción, ya que se disminuye el número de partes a unir y, además, permite optimizar la geometría del producto final estampado^[4].

La soldadura de las diferentes piezas que conforman el formato a medida se puede realizar mediante las siguientes técnicas: resistencia con puntos soldados, haz de electrones y láser. La soldadura láser es el sistema más utilizado debido a, entre otras razones, la capacidad de focalizar el haz y, por tanto, re-

(*) Trabajo recibido el día 16 de mayo de 2003 y aceptado en su forma final el día 6 de mayo de 2004.

(*) Fundación CETENASA, Polígono Mocholí, N° 4, 31110 Noaín, Navarra.

(**) LORTEK, La Granja auzoa, z.g., 20240 Ordizia, Guipúzcoa.

ducir la anchura del cordón de soldadura y de la región o zona afectada por la temperatura (ZAT)^[5 y 6].

Existen varios tipos de láseres, entre los que pueden destacarse los de CO₂, NdYAG y diodo. El interés del láser de diodo radica en sus características: puede alcanzar una potencia máxima de, hasta 6 KW, emite el haz luminoso en el infrarrojo cercano (entre los 800 y 900 nm) y la relación entre tamaño y peso le hacen adecuado para aplicarlo directamente sobre el material sujeto a procesos, evitando el uso de ópticas transportadoras del haz (espejos y fibra óptica) que los otros láseres utilizan. Estas razones motivan que el láser de diodo sea empleado, además de para soldadura, en otras aplicaciones industriales como tratamientos superficiales, endurecimiento mediante recubrimientos^[7] o nitruración^[8].

La tendencia de la industria de la automoción, en los últimos años, va dirigida hacia la introducción de nuevos aceros de alta resistencia (HSS) o elevado límite elástico, que permiten manejar menores espesores y, por tanto, reducir el peso y, posiblemente, el coste del vehículo, sin perder resistencia ni seguridad^[3].

Por todo ello, en este trabajo se presenta un estudio de las posibilidades que ofrece el láser de diodo para soldar aceros de alta resistencia, de espesores disimulares, que pueden formar parte de los *tailored blanks*: aceros microaleados ferríticos, ZStE, los de fase dual, DP (*dual phase*) y los TRIP (*transformation induced plasticity*).

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se estudió la soldadura de chapas de aceros de alta resistencia: dos aceros ZStE, de espesor 0,8 mm y 1,5 mm, respectivamente; dos aceros DP, con espesores de 1 mm y 1,5 mm; y dos aceros TRIP, con espesores de 1 mm y 2

mm. La composición química de estos materiales se detalla en la tabla I.

La caracterización metalográfica de estos materiales base se llevó a cabo en un microscopio óptico Nikon modelo EPIHOT. Después de las correspondientes etapas previas de lijado y pulido, para el revelado de la microestructura en los aceros ZStE, se utilizó como reactivo de ataque el llamado *Dino* y, para los demás materiales, el reactivo *LePera* que permite diferenciar la martensita de la bainita^[9 y 10]. Por otro lado, para el cálculo de sus propiedades mecánicas se realizaron los ensayos en la máquina "Servosis" modelo MUE-20.

La soldadura de los materiales base se realizó empleando un láser de diodo de alta potencia, que emite el haz luminoso en el infrarrojo y llega hasta una potencia máxima de 3 KW. Para encontrar las condiciones de soldadura correctas, se ensayó bajo diferentes velocidades (entre 0,016 y 0,066 m/s) y potencias (entre 2 y 3 KW), eligiéndose los parámetros óptimos para llevar a cabo las soldaduras, en función de las características de los cordones obtenidos. La caracterización metalográfica de las soldaduras se realizó con el microscopio óptico mencionado anteriormente, empleándose *Nital* al 2 %, como reactivo, para el revelado de la microestructura. Por otra parte, para la caracterización mecánica se realizaron ensayos de microdureza, embutición, tracción y fatiga. Se efectuaron barridos de microdurezas de la sección transversal a lo largo del cordón de soldadura y de la ZAT, cada, aproximadamente, 200 μ , utilizando un microdurómetro *Shimadzu*, modelo M. Los ensayos de embutición sobre probetas de 95 mm X 95 mm se realizaron en una máquina FAGOR, modelo UNI, dejando el cordón de soldadura en el centro, en el caso de las probetas soldadas, con el objetivo de obtener el índice de embutibilidad o estampación (% E), definido como el cociente entre la altura de la

Tabla I. Composición química de los aceros o materiales base

Table I. Chemical composition of the steels or base materials

Acero	Espesor mm	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Ti %	V %	Cr %	Ni %	Mo %
ZStE	0,8	0,0064	0,0897	0,5943	0,0359	0,0077	0,0630	0,05	<0,005			
	1,5	0,0033	0,0793	0,5872	0,0297	0,0084	0,0332	0,07	<0,005			
DP	1	0,053	0,32	1,22	0,008	0,004	0,032	0,0325	0,0325	0,49	0,02	0,02
	1,5	0,054	0,124	1,208	0,01	0,002	0,024		<0,005	0,50	0,02	0,01
TRIP	1	0,2049	1,6415	1,6277	0,013		0,03			0,02	0,02	0,01
	2	0,2097	1,6834	1,6620	0,016		0,03			0,02	0,02	0,01

copa tras el ensayo en la probeta soldada y la altura de la copa en el material base sin soldar.

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en la máquina "Servosis" modelo Me-402-2 y los de fatiga en una bancada de ensayos "Servosis" modelo MUF 406/5-2, cargando entre el 60 y el 90 % del límite elástico con una frecuencia de 25 Hz.

Para finalizar, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, algunas muestras de aceros TRIP soldadas se sometieron a un tratamiento térmico de revenido, durante 1 h, a la temperatura de 500 °C, en un horno convencional HERON modelo 12 PR/400. Sobre muestras soldadas de aceros TRIP revenidas se efectuó, también, la correspondiente caracterización microestructural y mecánica, tal y como se ha descrito anteriormente para el resto de soldaduras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo, se ha procedido, en primer lugar, a la caracterización microestructural y mecánica de los materiales base. Las micrografías de la sección transversal de los materiales base se presentan en la figura 1. Los aceros ZStE presentan una microestructura ferrítica, en la que se pueden observar TiN de gran tamaño debidos a la elevada cantidad de titanio que poseen estos aceros. Por su parte, los DP presentan las siguientes fases: martensita (en color blanco), bainita (color oscuro) y ferrita (color ocre), siendo esta última fase la mayoritaria y no superando la fracción volumétrica del 15 %, el conjunto de las restantes. Por último, los aceros TRIP contienen, además de las fases presentes en los aceros DP, austenita retenida (en color blanco, al igual que la martensita) y, como fase predominante, con una fracción volumétrica mayor al 50 %, la ferrita. En los aceros TRIP no se puede distinguir, metalográficamente, entre martensita y austenita retenida^[9 y 10], siendo posible esa distinción mediante el empleo de otras técnicas de análisis como, por ejemplo, los Rayos X.

Con respecto a las propiedades mecánicas, se llevaron a cabo los ensayos de tracción para verificar la elevada resistencia que poseen estos materiales. En la tabla II se recogen los valores de resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento. Los aceros DP y TRIP, al poseer en su microestructura fases como la bainita y la martensita, poseen una mayor resistencia a la tracción con respecto a los aceros ZStE. Al mismo tiempo, cabe destacar que estos aceros no presentan grados de alargamiento excesivamente bajos y aunque no llegan a los ni-

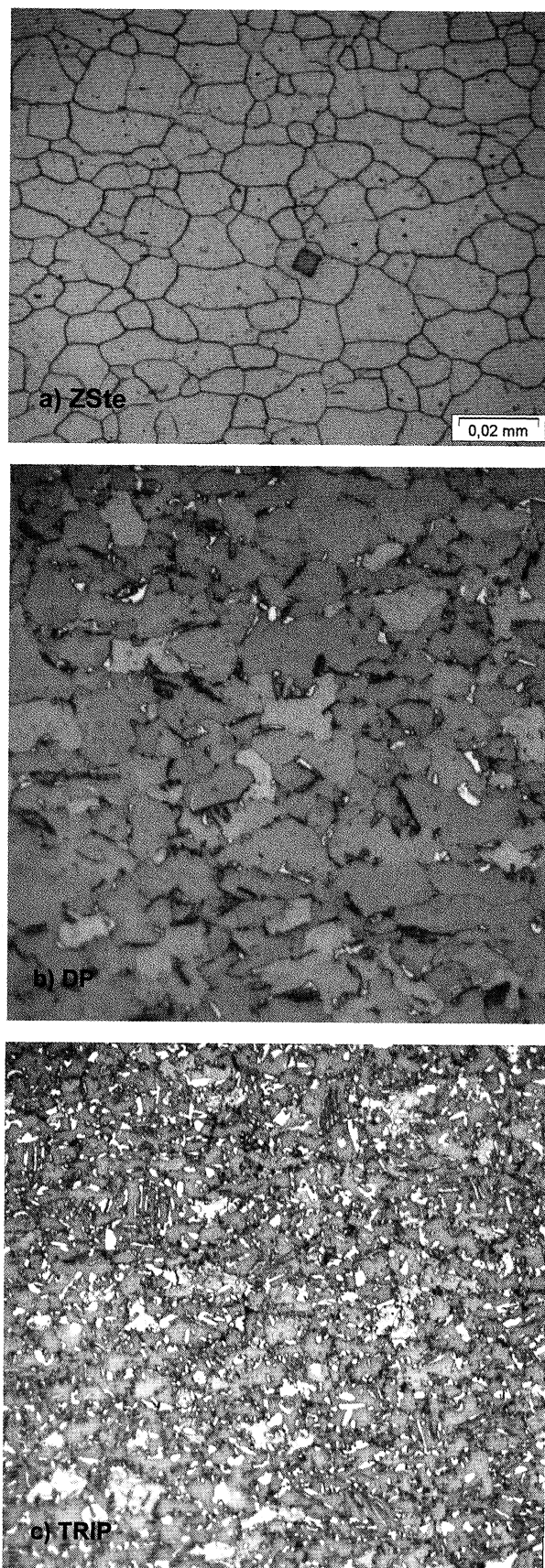


Figura 1. Micrografías de los diferentes aceros o metales base.

Figure 1. Optical micrographs of the steels or base materials.

Tabla II. Propiedades mecánicas de los aceros o materiales base

Table II. Mechanical properties of the steels or base materials

ACERO	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Alargamiento (%)
ZStE	350	200	40
DP	440	276	33
TRIP	817	519	19

veles de alargamiento que alcanzan los aceros ZStE, pueden emplearse en formatos a medida que no requieran una excesiva sollicitación de embutición o estampación. Los aceros que combinan, en su microestructura, ferrita con otras fases como bainita o/y martensita pueden presentar elevados niveles de resistencia y un adecuado alargamiento y, por tanto, aplicarse en la industria de la automoción, en partes

de la carrocería que requieran como característica poseer una buena conformabilidad^[11].

Para soldar estos materiales se empleó un láser de diodo, cuyas características más importantes se comentaron anteriormente. Una vez realizadas las soldaduras de los diferentes materiales, se seleccionaron, en primer lugar, aquellas soldaduras con mejor aspecto y, después, se procedió a verificar la calidad de las mismas mediante caracterización microestructural y mecánica. Así, empleando técnicas metalográficas se observó el perfecto estado de los cordones de soldadura en diferentes puntos, ratificando la inspección visual previa. En la figura 2 se muestran las micrografías de los diferentes cordones de soldadura: a) aceros ZstE; b) aceros DP; c) aceros TRIP; y d) aceros TRIP más posterior tratamiento térmico de revenido. El cordón de la soldadura de aceros ZStE presenta una microestructura muy heterogénea, con presencia de granos de gran tamaño y no excesivamente equiaxiales, que se debe a que estos aceros poseen niveles de carbono muy ba-

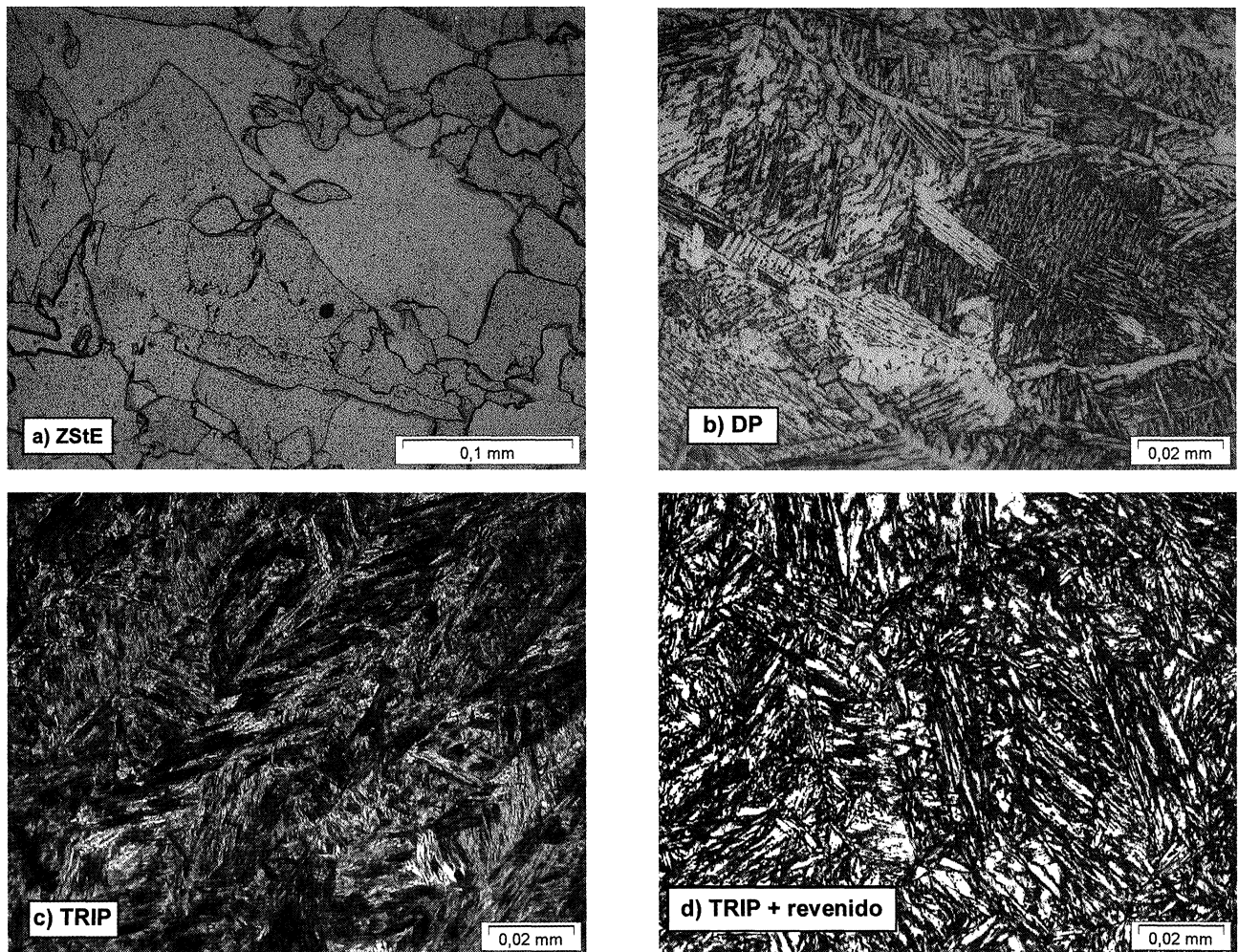


Figura 2. Micrografías obtenidas en los diferentes cordones de soldadura.

Figure 2. Optical micrographs in the different welding seams.

jos^[12]. En la soldadura de los aceros DP se observa una microestructura multifásica, con predominio de las fases bainita y ferrita acicular sobre la martensita. Por su parte, el cordón de la soldadura de los aceros TRIP está formado, mayoritariamente, por martensita, con estructura de laminas o acicular muy compacta. Esta última microestructura se ve modificada notablemente al realizarse el correspondiente tratamiento térmico de revenido, que elimina las tensiones internas de la martensita y, entre otros efectos, provoca un aumento de la ductilidad^[12].

Los barridos de microdurezas llevados a cabo sobre la sección transversal de los cordones de soldadura estudiados se muestran en la figura 3 a). El cordón de la soldadura de los aceros TRIP posee la mayor dureza de todos, debido a la gran fracción volumétrica de martensita que presenta. Esta dureza se ve notablemente reducida con el tratamiento térmico post-soldadura, debido a que el revenido modifica de manera considerable, la estructura martensítica (dura y frágil). Es importante destacar que, en el cordón de soldadura de los aceros ZStE, al estar compuesto únicamente por ferrita, se obtiene el nivel más bajo de dureza. Únicamente, en la soldadura de aceros TRIP se obtienen niveles de dureza muy elevados, que llevan a valores del cociente entre la dureza del cordón de soldadura y del material base en torno a 2, lo que está muy próximo a los valores presentados en otro trabajo encontrado en la bibliografía^[14].

Una de las características que hay que exigir a las soldaduras de los *tailored blanks* es una buena embutibilidad, para evitar problemas en el proceso de estampación. De ahí, que se efectuaran ensayos de embutición en la máquina mencionada en el apartado de materiales y procedimiento experimental, obteniéndose el valor del índice, E. En la figura 3 b) se observa que la soldadura de los aceros ZStE es la única que cumple las especificaciones^[13], con un valor de E, alrededor del 70 %, mientras que la soldadura de los aceros DP posee un valor de E muy próximo al requerido, en torno al 60 % y la soldadura de los aceros TRIP presenta un valor muy inferior, alrededor del 40 %.

Siguiendo con el análisis del comportamiento de las soldaduras en el proceso de estampación, se caracterizaron las probetas soldadas tras el correspondiente ensayo de embutición. El estudio se realizó en base al criterio de la posición y tipo de fractura (transversal o paralela al cordón de soldadura)^[14]. En todas ellas se produce la fractura en la dirección longitudinal a la soldadura, bien en la ZAT o bien en el propio cordón de soldadura,

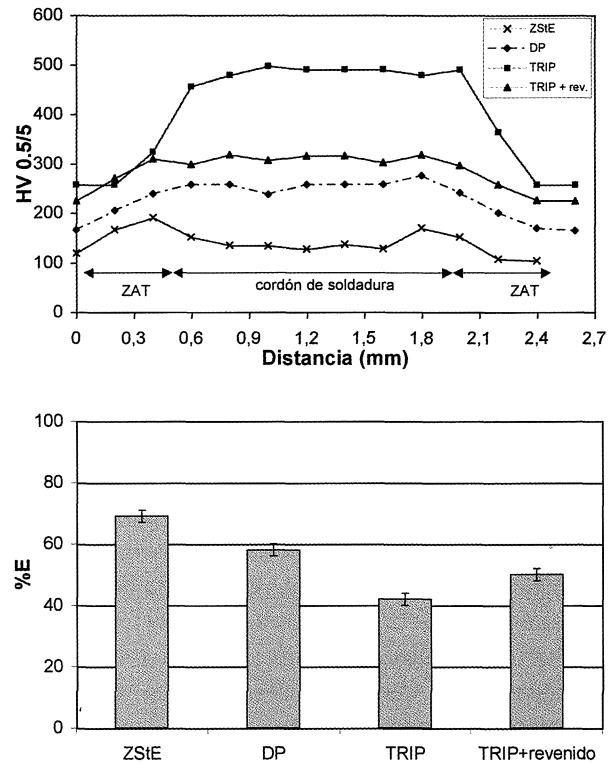


Figura 3. a) Valores de los barridos de microdurezas de las diferentes soldaduras. b) Valores del índice de embutibilidad, % E, de las soldaduras estudiadas.

Figure 3. a) Microhardness values for the studied weldings. b) Percentage of stampability or embutibility, % E, for each welding.

con la única excepción de la soldadura de los aceros TRIP, en la que la fractura se produce de manera frágil y transversal al cordón.

Por último, para completar el estudio de las propiedades mecánicas, se realizaron los correspondientes ensayos de tracción y fatiga sobre las probetas soldadas, cuyos resultados más relevantes se muestran en la Tabla III.

Las soldaduras de los aceros ZStE y DP presentan unas excelentes propiedades mecánicas ya que en los ensayos de tracción, siempre, se produjo la rotura en una región correspondiente al material base y, por tanto, la unión supera los niveles de resistencia de los materiales base. Además, el comportamiento a fatiga, superando sin producirse rotura $1,5 \cdot 10^6$ ciclos, corrobora la excelente calidad de estas uniones. Los aceros multifásicos presentan un buen comportamiento a fatiga, de ahí, que los aceros multifásicos estén siendo empleados en partes de la carrocería que necesitan absorber la energía de impacto^[14].

Por otra parte, el tratamiento térmico de revenido, post-soldadura, tiene un efecto muy positivo

Tabla III. Propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos de tracción y fatiga en las soldaduras estudiadas*Table III. Mechanical properties in the different studied weldings*

Soldadura	Resistencia a la tracción (MPa)	Número de ciclos hasta rotura
ZStE	374	> 1,5·10 ⁶
DP	468	> 1,5·10 ⁶
TRIP	368	@ 3·10 ⁵
TRIP + rev.	724	@ 1,1·10 ⁶

en la soldadura de los aceros TRIP, provocando un aumento considerable de la resistencia de la soldadura y del número de ciclos antes de rotura, en el ensayo de fatiga, calculado en más de medio millón. Estos resultados indican que la microestructura martensítica desarrollada en el cordón de soldadura de los aceros TRIP es muy frágil e imposibilita su uso para estampación o embutición profunda.

Teniendo en cuenta la imposibilidad, a nivel industrial, de llevar a cabo tratamientos térmicos de revenido, post-soldadura, el empleo de sistemas de inducción para precalentar la región a soldar *in situ*, en el proceso de soldadura o bien el post-calentamiento a modo de *post-welding heat treatment*, constituyen una posible solución al problema. Aplicando la expresión del carbono equivalente compensado (CEC)^[15] se obtiene que, la mejor solución teórica para los aceros TRIP es la primera comentada anteriormente, esto es, el empleo de un calentamiento de la región a unir, justamente, antes de llevar a cabo la soldadura.

4. CONCLUSIONES

- En los cordones de soldadura de los aceros TRIP y DP se desarrollan microestructuras bainítico-martensíticas o martensíticas que dan lugar a que las propiedades mecánicas para estampación de los mismos sean inferiores a las que posee el cordón de la soldadura de los aceros ZStE.
- La soldadura de los aceros TRIP presenta ciertas limitaciones para ser aplicada en *tailored blanks*, mejorándose sus propiedades notablemente para dicha aplicación con un tratamiento térmico post-soldadura. Con este tratamiento se produce un ablandamiento en el cordón

de soldadura, incrementándose al mismo tiempo el nivel de embutibilidad y la resistencia.

- Con los aceros ZStE y DP se obtienen soldaduras con una resistencia mecánica superior a los materiales base y con un comportamiento a fatiga excelente.
- Una solución para mejorar la soldadura de los aceros TRIP a nivel industrial es el empleo de post-calentamiento por inducción; o, incluso, la posibilidad de realizar un precalentamiento por inducción justo antes de llevar a cabo la soldadura.

REFERENCIAS

- [1] A.FH. KAPLAN, J. ZIMMERMANN y D. SCHUÖCKER. *Proc. ISATA '97*, D. Roller (Ed.), Florencia, Italia, 1997, pp. 323-328.
- [2] *Advanced Vehicle concepts. Technical Transfer Dispatch* No. 6. ULSAB-AVC Body Structure, <http://www.ulsab-avc.org>, May, 2001.
- [3] C. ESPINA y R. MORO, *Jornada Técnica Redauto*, Barcelona, España, 2002, pp. 38-48.
- [4] D. NINFORGE y J. DAWANCE. *Proc. 20th Bienn. Congr.*, Belgium, 1998, pp. 511-518.
- [5] S. GOTTSCHILING, P. KUGLER y P. HOFFMANN, *ERLAS Erlanger Lasertechnik. Lasermarkt*, 2001, pp. 25-29.
- [6] P. KUGLER, S. GOTTSCHILING y P. HOFFMANN, *ERLAS Erlanger Lasertechnik GmbH. DVS 212*, pp. 99-103.
- [7] A. CONDE, F. ZUBIRI y J. DE DAMBORENEA. *Met. Sci. Eng. A334* (2002) 233-238.
- [8] M.G. PÉREZ, N.R. HARLAN, F. ZAPIRÁIN y F. ZUBIRI. Aceptado para ser publicado en *Surface & Coatings Technology*, 2002.
- [9] E. GIRAULT, P. JACQUES, Ph. HARLET, K. MOLS, J. VAN HUMBEECK, E. AERNOUDT y F. DELANNAY, *Materials Characterization* 40 (1998) 111-118.
- [10] P.S. LEPERA. *Metallography* 12 (1979) 263-268.
- [11] C. MESPLONT, S. VANDEPUTTE y B.C. DE COOMAN. *43rd MWSP Conf. Proc.*, ISS, Vol. XXXIX, 2001, pp. 359-371.
- [12] S.H. AVNER. *Introducción a la metalurgia física de los aceros*. Ediciones del Castillo, 1^a ed., España, 1966, pp. 200-277.
- [13] Normalisation Renault automobiles, Service 65810, Section Normes et Cahiers des Charges, 32-00-019/B, 2001, pp. 10-14.
- [14] A. PICHLER, S. TRAIANT, H. PAULI, H. MILDNER, J. SZINYUR, M. BLAIMSCHEIN, J. STIASZNY y E. WERNER. *43rd MWSP Conf. Proc.*, ISS, Vol. XXXIX, 2001, pp. 411-434.
- [15] F. CARRILLO y E. LÓPEZ. *Soldadura, corte e inspección de obra soldada*, Universidad de Cádiz, 3^a ed., España, 1993, pp. 289-304.