

Soldadura aluminotérmica de carriles

J. O. García; M. A. Huerta; Prof. Dr. J. I. Verdeja

Laboratorio de Metalotecnia E.T.S.I.M.O. (Departamento Ciencia de Materiales de la Universidad de Oviedo)

Resumen

Este trabajo recoge el conjunto de propiedades en uniones de carriles ferroviarios, soldados aluminotérmicamente, según procedimiento registrado KLK-SOLDAL.

Abstract

This work summarizes the set of properties fitted by aluminothermic weld rails, following procedures of the registered trade mark KLK-SOLDAL.

1. Introducción

En artículos anteriores (1, 2, 3) hemos sentado las bases metalúrgicas de los aceros que, con estructuras predominantemente perlíticas, son materiales de elección para la fabricación de carriles. Parámetros fundamentales de diseño son su resistencia mecánica (carga de rotura, R_m) y al desgaste (dureza, HBS), con unos mínimos de ductilidad y resiliencia que aseguren, según los casos, su correcto funcionamiento a temperaturas iguales o inferiores a la ambiente (hasta -20°C). La selección se centra pues en aceros ligeramente hipoeutectoides (de matriz ferrítica) o eutectoides (estructura perlítica), descartando por razones de baja tenacidad aquellos aceros, los hipereutectoides, en los que la cementita pasa a ser constituyente matriz. De forma general, la carga de rotura de un acero ferrito-perlítico viene expresada por la ecuación:

$$R_m = f\alpha^{1/3} R_{mF} + (1 - f\alpha^{1/3}) R_{mP} \quad [1]$$

siendo $f\alpha$, R_{mF} y R_{mP} la fracción de ferrita y las cargas de rotura en tracción de ferrita y perlita respectivamente. Para la ferrita fina (tamaño de grano ≥ 10 ASTM), $R_{mF} \geq 500$ MPa. Para la perlita, dependiendo de su espaciado interlaminar, $R_{mP} \geq 800$ MPa. Como además, en aceros hipoeutectoides se verifica, con un ajuste adecuado, la correlación:

$$\text{HBS} \approx 3 R_m \text{ (Kg/mm}^2\text{)} \quad [2]$$

entre dureza y carga de rotura, se deduce muy fiablemente

que, la resistencia mecánica y dureza de los aceros para carriles depende, en primer orden, de los rasgos estructurales del constituyente o fase mayoritaria, la perlita; o en otros términos de su distancia interlaminar, S ; y en segundo orden, secundariamente, de otros parámetros químicos y microestructurales (contenidos en Mn y Si, fracción en volumen y tamaño de grano de la ferrita, etc.). La relación propuesta entre dureza (parámetro mecánico de fácil medida) y espaciado interlaminar, es del tipo Hall-Petch (4):

$$\text{HBS} \approx 118,5 + 2,3 S^{-1/2} \quad [3]$$

S , espaciado interlaminar expresado en mm.

Trataremos, pues, con carriles normales, duros o extraduros, atendiendo a la naturaleza ligeramente hipoeutectoide (fracción en volumen de ferrita inferior al 15 %) o eutectoide (100 % perlítica) del acero y a su modalidad de enfriamiento desde el estado austenítico posterior a la laminación (lento o acelerado), que decidirá el espaciado laminar de la perlita, su dureza y carga de rotura, en concordancia con las fórmulas anteriores. Nos encontramos, así, con las tres calidades de carriles habitualmente empleadas en redes ferroviarias:

- Carril normal, de estructura ferrito-perlítica y espaciado interlaminar grueso ($S \approx 0,30 \mu\text{m}$; $R_m \approx 700$ MPa).
- Carril duro, de estructura perlítica y espaciado interlaminar medio ($S \approx 0,20 \mu\text{m}$; $R_m \approx 900$ MPa).
- Carril extraduro, de estructura perlítica y espaciado interlaminar fino ($S \approx 0,10 \mu\text{m}$; $R_m \approx 1.100$ MPa). Este espaciado, fino, puede alcanzarse recurriendo al enfriamiento acelerado de aceros eutectoides al carbono y en el enfriamiento moderado de aceros eutectoides débilmente aleados (Cr, Mo).

El código UIC-860 marca, para estas tres calidades, los rangos de composición química y propiedades que, en la Tabla I, se adjuntan.

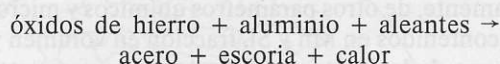
Hasta aquí algunas consideraciones generales sobre carriles que, posteriormente, habrán de ser soldados en vía, por las muchas ventajas que este tipo de unión comporta sobre el embreado (menores costos de mantenimiento, ausencia de

SOLDADURA ALUMINOTERMICA DE CARRILES

TABLA I.—COMPOSICION QUIMICA Y PROPIEDADES MECANICAS DE CARRILES
SEGUN CODIGO UIC-860

TIPOS	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Pmáx (%)	Smáx (%)	Rm (MPa)	A (%) (L ₀ = 5d)
CALIDAD 700	0,40 0,60	0,80 1,25	0,05 0,35	—	0,05	0,05	680 830	≥ 14
CALIDAD 900 A	0,60 0,80	0,80 1,30	0,10 0,50	—	0,04	0,04	> 880	≥ 10
CALIDAD 900 B	0,55 0,75	1,30 1,70	0,10 0,50	—	0,04	0,04	≤ 1.030	—
CALIDAD 1.100	0,60 0,82	0,30 0,90	0,90 1,30	0,80 1,30	—	0,03	≥ 1.080	≥ 9

vibraciones e impactos, evitación de pérdidas en el transporte de materias primas, etc.). El proceso aluminotérmico de soldadura de carriles está basado en la reacción:



La reacción se inicia con un cebador adecuado y dado el carácter fuertemente exotérmico de la reacción, las temperaturas alcanzadas, del orden de 2.500 °C, permiten la reducción de los óxidos de hierro por el aluminio, su fusión y mezcla con los aleantes, y la formación de una escoria líquida que protege el baño. Con otras palabras, el proceso de soldadura aluminotérmica de un carril tiene verdadera similitud con el de elaboración, afino y colada de un acero en el interior de un molde, en este caso refractario. Deben tomarse, pues, las precauciones adecuadas para evitar los defectos físicos (rechupes, porosidad, grietas de contracción) y químicos (macro y microsegregaciones) que todo proceso de solidificación comporta; y las derivadas de la soldadura de acero con medio o alto contenido en carbono, es decir, un precalentamiento previo del borde de los perfiles que asegure que la

unión carril-acero aluminotérmico-carril sea química, física y estructuralmente correcta. A este respecto la serie completa de operaciones carril-carril, efectuadas en este trabajo, siguiendo el procedimiento y kits de soldadura manufacturados y registrados por KKK-SOLDAL, a saber: preparación de la cala, alineación de carriles, posicionamiento del molde, cubeta de escoria y sellado, montaje y posicionamiento del crisol, modalidades de precalentamiento (vid. Tabla II), carga, reacción, decantación y colada del acero aluminotérmico, desmoldeo, desbaste y acabado de la soldadura, se encuentran suficientemente descritos en el catálogo de referencia (5).

Las normas de recepción y homologación de procesos de soldeo aluminotérmico de carriles requieren, evidentemente, la necesaria adecuación del acero aluminotérmico con el acero base, en cierto modo abierta a las exigencias del usuario. Ensayos de recepción habituales son los de dureza HBS 10/3.000, flexión en tres puntos, Fig. 1, y metalografía de la unión soldada. Y en los de homologación, además, macrografías y perfil de durezas interno HBS 2,5/187,5 en secciones longitudinales.

Por lo que se refiere a los dos primeros parámetros rese-

TABLA II.—TIPOS DE PRECALENTAMIENTO DE CARRILES
PARA SOLDADURA ALUMINOTERMICA

PROCEDIMIENTO		Ancho cala (mm)	Temperatura precalentamiento (°C)	Tipo precalentamiento	Tiempo (min)
PRECALENTAMIENTO TOTAL	PN	18 ± 2	850/900	GASOLINA-AIRE 0,2 bar	10 - 15
PRECALENTAMIENTO CORTO	PC	23 ± 2	350/400*	GLP 1,8 bar-AIRE INDUC.	5
PRECALENTAMIENTO CORTO CALA ANCHA	CA	48 ± 3	350/400*	„	5

* Es posible hacer el precalentamiento con oxipropano en 90 seg.

ENSAYOS DE DUREZA Y FLEXION EN PROBETAS SOLDADAS POR ALUMINOTERMIA

1.-ENSAYO DE DUREZA HBS 10/3.000, media de tres ensayos Brinell con bola de acero Ø 10 mm y fuerza 3.000 Kg.; según Norma RENFE-Vía 3-3-2.4. la dureza de la soldadura debe ser:

Para carril 700 N/mm²: 240 a 278 HBS
900 N/mm²: 288 a 326 HBS

2.-ENSAYO A FLEXION ESTATICA

Exigencias mínimas según Norma RENFE-Vía 3-3-2.4.

CALIDAD	700	900	1.100	Flecha mm
Perfil				
RN 45	42T			9
UIC 54	63T	75T	85T	9
UIC 60	75T	90T	102T	9

La aplicación de la carga se hará a una velocidad máxima de 4 T/minuto.

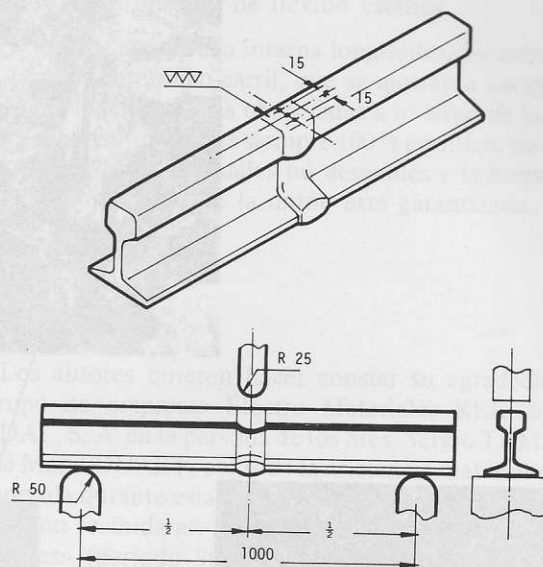


Fig. 1.-Esquema del ensayo de flexión estática empleado en la recepción de conjuntos para soldeo aluminotérmico.

ñados, la norma RENFE-Vía 3-3-2.4. (6), estipula para el acero aluminotérmico las siguientes condiciones:

Cargas aluminotérmicas	700 MPa	900 MPa	1.100 MPa
Dureza acero HBS	260 ± 20	300 ± 20	340 ± 20
Resistencia mínima en flexión (MPa)	500	600	700
Flecha mínima en flexión (mm)	9	9	9

Hemos de resaltar que todas las soldaduras aluminotérmicas de carriles, en sus tres calidades, efectuadas por el procedimiento KLK-SOLDAL, que hemos investigado, se encuentran dentro de los límites establecidos (durezas), rebasando las cargas y flechas mínimas exigidas en el ensayo de flexión estática. Aún más, las cargas unitarias, correspondientes a la flecha mínima de 9 mm, se cifran en los 600, 700 y 850 MPa respectivamente para las soldaduras de carril normal, duro y extraduro, todo ello con independencia de la modalidad de procedimiento empleado, Tabla II, que tiende a adecuarse a la facilidad de puesta en obra del equipo de soldadura, fiabilidad del operario, necesidades de reparación en vía, etc.

II. Valoración de resultados

A modo de ejemplo, para mostrar el ajuste de los aceros aluminotérmicos empleados a la resistencia mecánica de los

carriles, en la Fig. 2 se recoge la macrografía en sección longitudinal, en la soldadura tipo PC 23 de un carril duro, adjuntándose metalografías a 700 x del acero aluminotérmico (metal de aporte), de la zona de fusión, de la zona afectada por el calor (ZAC), de la zona de transición ZAC-metal base y del carril en estado de recepción. En todas ellas se comprueba que la estructura es 100 % perlítico-laminar, excepto en la última zona de transición, del lado del acero base, en la que la perlita está parcialmente globulizada. En la Fig. 3, se adjunta el perfil de dureza interna HBS 2,5/187,5, en sección longitudinal, medido a 10 mm de la pista de rodadura de una probeta soldada UIC 60-900 (8). Los máximos de dureza medidos (ZAC próxima al metal de aporte) no conllevan riesgos de fisuración, tanto más cuanto que la estructura no presenta fases de no equilibrio, duras (bainita, martensita); y los mínimos de dureza (ZAC próxima al carril) no deterioran el comportamiento al desgaste, debido al endurecimiento por deformación que experimentarían durante la rodadura de los trenes (9). De este particular aspecto nos ocuparemos en un artículo posterior.

Por lo que respecta al ensayo de flexión estática, adjuntamos el gráfico medido flechas-resistencia mecánica-carga total soportada por una probeta soldada UIC 60-900, Fig. 4. Se confirman los datos ya anteriormente enunciados: que la unión soporta satisfactoriamente la carga unitaria estipulada, 600 MPa, y que se rebasa sin rotura la flecha de 9 mm para una tensión aplicada de 700 MPa. Aún más, en este caso, la carga de rotura alcanzada, 1.000 MPa, supera la mínima requerida para el carril de 900 MPa empleado en la soldadura aluminotérmica.

SOLDADURA ALUMINOTERMICA DE CARRILES

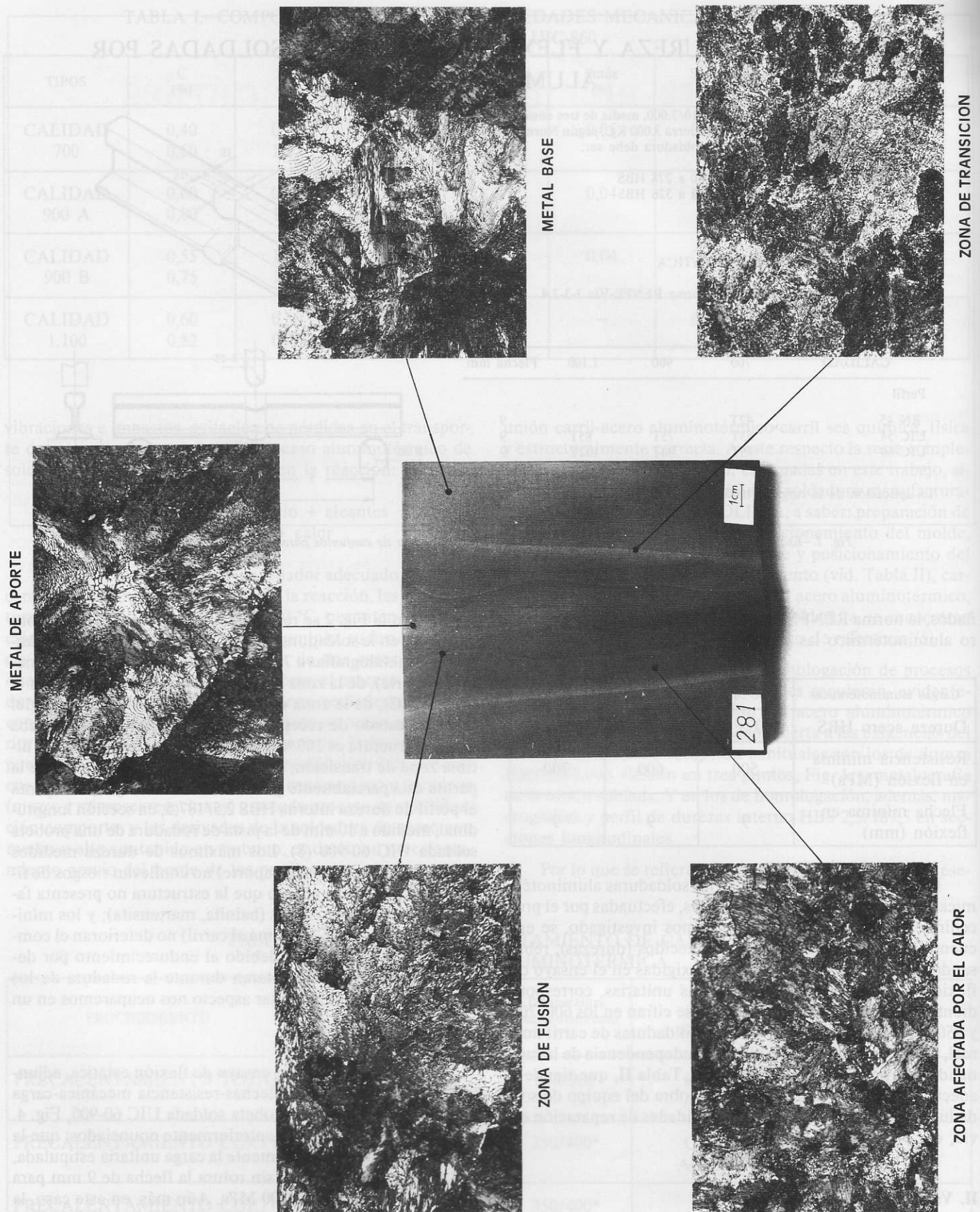


Fig. 2.—Macrografía y micrografías a 700 x de la soldadura aluminotérmica de un carril duro UIC 60-900.

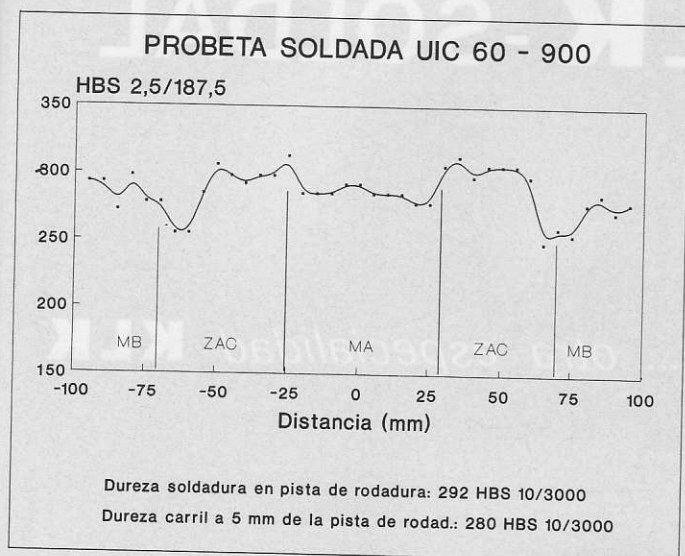


Fig. 3.—Perfil interno de durezas de la soldadura anterior.

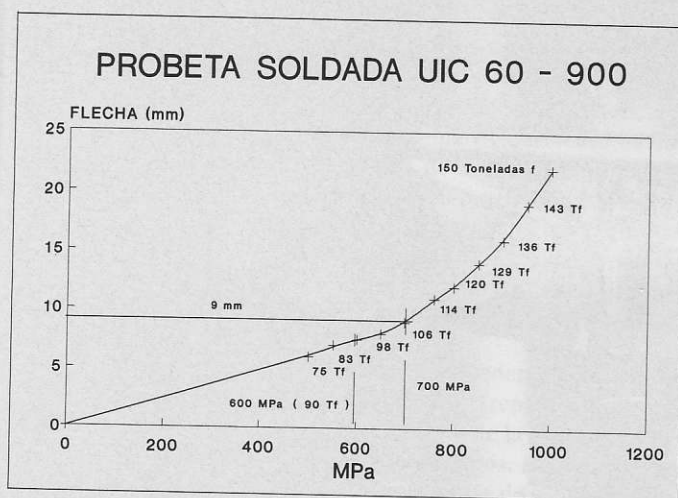


Fig. 4.—Curva deformación (flechas)-tensión unitaria del ensayo de flexión estática de una soldadura aluminotérmica KLK-SOLDAL de un carril UIC 60-900.

III. Conclusiones

Los procesos de soldadura aluminotérmica, llevados a cabo con materiales y procedimientos KLK-SOLDAL, sobre los distintos tipos de carriles actualmente en uso (normal, duro y extraduro) y a juzgar por los resultados obtenidos en este trabajo, garantizan y encuadran muy satisfactoriamente:

- Los intervalos de dureza requeridos en el acero aluminotérmico, función de la resistencia mecánica del carril empleado.
- Los mínimos de esfuerzo unitario y flecha acordados para los ensayos de flexión estática.
- Perfiles de dureza interna longitudinales carril-acero aluminotérmico-carril, que se ajustan a las estructuras metalográficas observadas a lo largo de la unión: el constituyente es siempre 100 % perlítico, no existen fases duras residuales no deseables y la homogeneidad mecánica de la unión está garantizada.

Agradecimientos

Los autores quieren hacer constar su agradecimiento al grupo de empresas Electro Materiales KLK, S. A. y SOLDAL, S. A. en la persona de los Sres. Sergio TAMARGO y José María DUART, por toda la asistencia material y técnica aportada durante esta investigación. A la FICYT, por la financiación recibida en el Proyecto «Nuevos aceros para ferrocarriles» (período 90-92). Finalmente a don Benjamín FERNANDEZ, de ENSIDESA, por su constante apoyo y colaboración.

Bibliografía

1. J. M. MARTINEZ, J. ASENSIO, J. I. VERDEJA. Def. Met., n.º 165, pp. 31-36 (1990).
2. J. M. GONZALEZ-FELGUEROSO, J. ASENSIO, J. I. VERDEJA. Def. Met., n.º 169, pp. 42-48 (1990).
3. J. ASENSIO, J. RIBA, J. I. VERDEJA. Def. Met., n.º 172, pp. 29-34 (1991).
4. B. SUAREZ, J. ASENSIO, J. RIBA. Def. Met., n.º 174, pp. 29-32 (1991).
5. ELECTRO MATERIALES KLK, S. A. Procedimiento de soldadura carril-carril KLK-SOLDAL (1991).
6. RENFE. Pliegos de Condiciones RENFE-Vía P.R.V. 3-3-2.3. y N.R.V. 3-3-2.4. (1992).
7. INFORME N.º 900928 SOLDAL-ETSIMO.
8. INFORME N.º 920226 SOLDAL-ETSIMO.
9. METALS HANDBOOK. Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, pp. 692-704, 9.ª edición A.S.M. (1983).