

Soldadura aluminotérmica de carriles. Tecnología KLK-SOLDAL

J. I. Verdeja

Catedrático de Metalotecnia E.T.S.I.M.O. (Universidad de Oviedo)

J. A. Perosanz

Catedrático de Metalotecnia E.T.S.I.M.M. (Universidad Politécnica de Madrid)

Resumen

Este trabajo recoge las últimas tecnologías desarrolladas por el Grupo KLK-SOLDAL en la soldadura aluminotérmica de carriles con diferentes modalidades de precalentamiento así como el control de calidad de las mismas.

Palabras clave: Soldadura, aceros perlíticos, propiedades mecánicas.

Abstract

This works deals with the newest short preheated aluminothermic weld rails technologies developed by the KLK-SOLDAL group, and their quality control, macrographic, metallographic and mechanical testing as well.

Key words: Welding, pearlitic steels, mechanical properties.

1. Introducción

En opinión de algunos historiadores modernos, el desarrollo del ferrocarril ha contribuido al progreso industrial de nuestro tiempo tanto como, en épocas ya muy pretéritas, lo supuso para nuestros antepasados la invención de la rueda y la vela. Los dos principales elementos que constituyen el ferrocarril, locomotoras y carriles, proceden de Inglaterra. Ciñéndonos al desarrollo del carril, se comenzó deslizando los vagones sobre planchas de madera, posteriormente reemplazadas por bandajes de fundición, material que se reveló duro (admitía mayores capacidades de carga y tiempos de vida en servicio) pero frágil por lo que ya a principios del siglo XIX fueron sustituidas por carriles forjados de fundición maleable, más tenaces; y en la segunda mitad del siglo (años 1860) por aceros Bessemer con 0,7 % C, en estado forjado, cuyo mayor costo resultaba ampliamente compensado por su mayor durabilidad y capacidad de carga. La demanda de este tipo de aceros se incrementó hasta tal punto que sólo U.S.A. llegó a contar con unos 70 fabricantes de carriles. A principios de este siglo el proceso Bessemer fue, a su vez, desplazado por el Siemens-Martin básico que aseguraba carriles de mayor tenacidad, unido al desarrollo de nuevos procesos de laminación y enfriamiento que permitieron paliar o eliminar los problemas de fragilización por el hidrógeno presente en el acero. Otro paso importante en la tecnología del carril lo supuso, en los años 30, su soldadura aluminotérmica o por resistencia (hasta entonces los carriles se unían por pletinas roblonadas). Desde entonces, y aunque ningún acero de contenido en carbono ligeramente hipoeutectoide o eu-

tectoide puede considerarse fácilmente soldable, prácticamente todas las compañías ferroviarias han adoptado la tecnología de los carriles soldados; y ello por múltiples razones tales como la reducción de costos de mantenimiento del material fijo y rodante, mayor estabilidad y velocidades permisibles en los convoyes, menor consumo energético y mayor confort en los trenes.

Los estándares de longitud de carriles laminados suelen ser 18 ó 36 m. La obtención del carril continuo suele comportar dos fases:

- Proceso de soldadura eléctrico, por resistencia, efectuado en instalaciones habitualmente fijas, para obtener elementos de 144 ó 288 m de longitud.
- Proceso de soldadura aluminotérmica, empleado en la soldadura «in situ» de carriles simples (18/36 m) o pre-soldados eléctricamente (144/288 m). Comporta una serie de ventajas adicionales a saber: los equipos de soldadura son ligeros, robustos, de bajo precio, fácilmente desplazables y no necesitan fuentes externas de energía. En cuanto a la calidad de los «kits» de soldadura empleados, ésta viene ordinariamente asegurada por ensayos previos de recepción.

La Fig. 1 recoge la curva de tracción y estructura micrográfica, óptica y electrónica, de las tres calidades de carril, cargas de rotura $R_m = 700, 900$ y 1.100 MPa, habitualmente empleadas en redes ferroviarias. El límite elástico, carga de rotura y dureza aumentan con la finura, disminución de la distancia interlaminar ferrita-cementita, de la perlita, reduciéndose obviamente su plasticidad y alargamiento. Los carriles extraduros, 100 % perlíticos, presentan espaciados inferiores a $0,10 \mu\text{m}$.

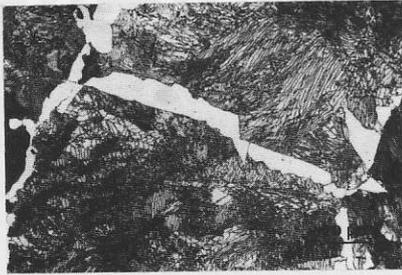
2. Soldadura aluminotérmica

Los kits de soldadura KLK-SOLDAL están formados por una carga, un dispositivo de destape, y el conjunto molde-placa de base-tapón, representados en la Fig. 2.

Las cargas aluminotérmicas están formadas por una mezcla pulverulenta de cascarilla (óxidos de hierro), granalla de aluminio y aleantes. El proceso de elaboración, selección, pesaje y mezcla de los componentes requiere gran precisión y pureza (contenidos en P y S bajos) y distribución granulométrica acorde con la homogeneidad de composición física y química (contenidos en C, Mn, Si, Al) exigidas al acero aluminotérmico.

SOLDADURA ALUMINOTERMICA DE CARRILES

MICROSCOPIA OPTICA



CARRIL 700 700x



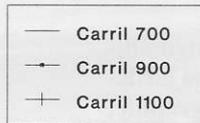
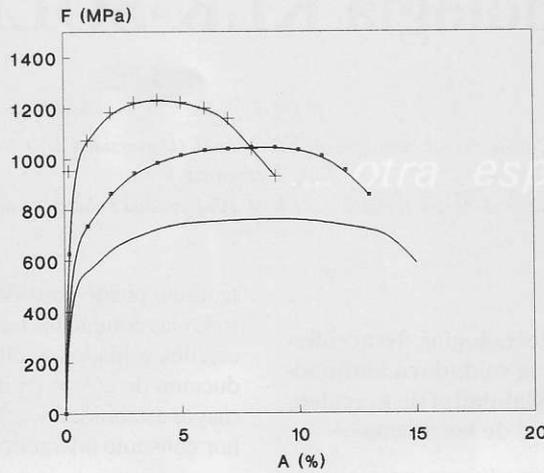
CARRIL 900 700x



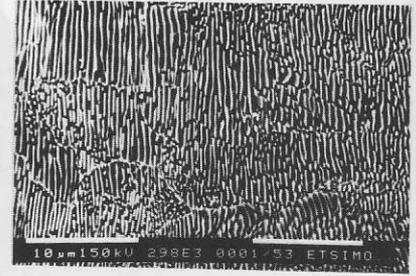
CARRIL 1100 700x

Fig. 1.-

CURVAS DE TRACCION Y ESTRUCTURAS TÍPICAS DE ACEROS PARACARRILES.



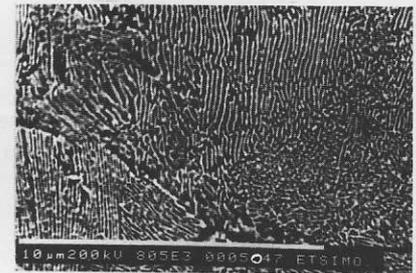
MICROSCOPIA ELECTRONICA



CARRIL 700 3200x

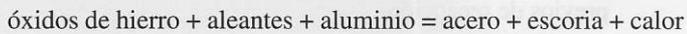


CARRIL 900 3200x



CARRIL 1100 8700x

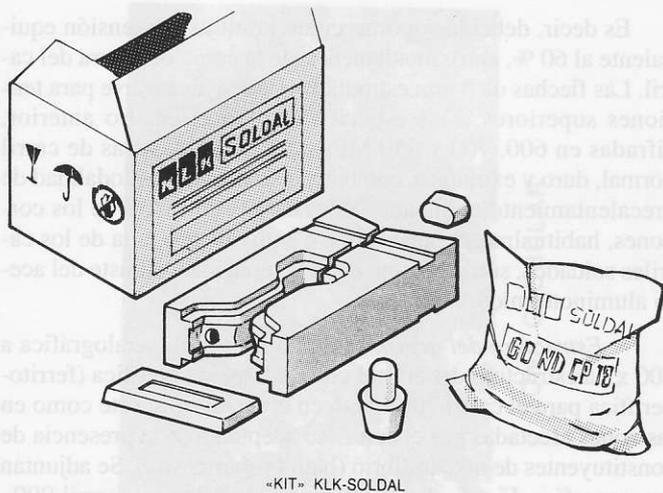
El proceso aluminotérmico de soldadura está basado en la reacción:



La mezcla de polvos citada se hace reaccionar en un crisol, provocando su ignición con un cebador, resultando, al cabo de pocos segundos, su transformación en acero fundido y escoria que flota. Este acero, que se encuentra a temperatura superior a los 2.000 °C se cuela automáticamente en un molde cerámico que contiene los extremos o puntas de los carriles, entre los que se verifica su soldadura por fusión. El producto de la reacción, el acero aluminotérmico, deberá poseer una composición química, carbono equivalente (C + Mn/6), microestructura y durezas preestablecidos, acordes con el carril. Baste decir a este respecto, que debe encuadrarse en un intervalo de durezas de ± 20 HBS cualesquiera sean el tipo de acero, perfil del carril y procedimiento de soldadura empleados. Tan estrictas características de composición química, dureza y resistencia mecánicas exigidas al acero aluminotérmico hacen necesario el empleo de dispositivos de colada y geometría de moldes particularmente idóneos para evitar tanto los defectos físicos (rechupes, porosidades, grietas de contracción), como los químicos (micro y macrosegregaciones) herencia del proceso de solidificación. Su ausencia proporciona a las uniones aluminotérmicamente soldadas, calidades mecánicas superiores a las exigidas por los FF.CC.

El precalentamiento del metal base, el carril, resulta obligatorio, por estar fabricados con aceros de contenido en carbono equivalente superiores a 0,42, pues de lo contrario aparecerían constituyentes de no equilibrio en las zonas afectadas por el calor (bainita, martensita), debido a una excesiva velocidad de enfriamiento, con el consiguiente riesgo de presencia de tensiones, deformaciones y grietas. En el Cuadro I se resumen las modalidades, calas (distancia entre carriles) y temperaturas de precalentamiento adoptadas por la tecnología KLK-SOLDAL. La calidad de las soldaduras suele ser similar en los tres procedimientos al uso. Debe señalarse que el precalentamiento normal exige mayor destreza en los operarios y equipos de calentamiento más lentos que en el proceso corto, al objeto de conseguir la temperatura de 850-900 °C requerida. Es por ello que la mayoría de los FF.CC. han adoptado la modalidad del precalentamiento corto, en el que la fiabilidad del soldador, equipo de calentamiento y temperatura alcanzada no es tan crítica como en el proceso normal, dado que la mayor parte del precalentamiento de las puntas de los carriles correrá a cargo del propio acero aluminotérmicamente fundido y colado en moldes de especial diseño.

Los kits de soldadura para precalentamiento corto, en calas normal y ancha, según tecnología KLK-SOLDAL, admiten las modalidades y equipos reseñados en los Cuadros I y II; en el Cuadro III, además, esquemáticamente se apunta, con carácter general, las principales ventajas e inconvenientes de cada proceso.



«KIT» KLK-SOLDAL

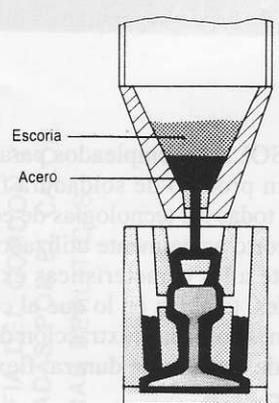


Fig. 2.-Kits KLK-SOLDAL y dispositivo de colada.

Cuadro II
Modalidades de precalentamiento corto (PC), en calas normal (23) y ancha (48) admitidos por los kits de soldadura aluminotérmica KLK-SOLDAL

Tipo de precalentamiento	Tiempo
Propano 1,8 bar-aire inducido (PC 1)	5 minutos
Oxipropano (PC 2)	90 segundos
Gasolina-aire 0,2 bar (PC 3)	3/5 minutos

En la práctica, los FF.CC. españoles sólo admiten el proceso de precalentamiento PC 1, vid. cuadros II y III, que emplea la mezcla propano-aire inducido, operativamente muy sencillo, con casi nulas posibilidades de error.

Las especificaciones mecánicas y estructurales que deben reunir las soldaduras efectuadas con acero aluminotérmico se centran en tres ensayos:

- *Ensayo de dureza* HBS 10/3.000, media de 3 ensayos Brinell con bola de acero de 10 mm de diámetro y carga de 3.000 Kg. La dureza de la soldadura deberá ser:

- Para carril de $R_m = 700$ MPa : 240 a 278 HBS
- Para carril de $R_m = 900$ MPa : 288 a 326 HBS
- Para carril de $R_m = 1.100$ MPa : 320 a 360 HBS

La Fig. 3 adjunta perfiles de dureza internos HBS 2,5/187,5, en sección longitudinal, medidos a 10 mm de la pista de rodadura, de probetas soldadas con las tres calidades de carril UIC-54. Las soldaduras cumplen los mínimos de dureza estipulados y las zonas adyacentes al cordón, térmicamente afectadas, no presentan constituyentes de no equilibrio, duros y frágiles, Fig. 4.

Cuadro I
Tipos de precalentamiento de carriles para soldadura aluminotérmica

Procedimiento	Tipos	Ancho cala (mm)	Temperatura precalentamiento (°C)	Observaciones
Precalentamiento total	PN	18 ± 2	850-900	-
Precalentamiento corto	PC	23 ± 2	350-600	-
Precalentamiento corto Cala ancha	PC CA	48 ± 3	350-600	Para reparaciones

3. Normas de los FF.CC. españoles sobre soldaduras aluminotérmicas

RENFE, al objeto de garantizar plenamente la calidad y fiabilidad de las soldaduras aluminotérmicas en vía, ha elaborado recientemente un conjunto de normas, de las más completas y exigentes en ferrocarriles hasta el momento, que pueden resumirse en cuatro apartados:

- 1.-Homologación de los procedimientos de soldadura.
- 2.-Recepción en origen de los kits de soldadura.
- 3.-Formación y homologación de soldadores.
- 4.-Recepción de soldaduras en vía.

- *Ensayo de flexión* estática en tres puntos, según geometría recogida en un artículo anterior, con velocidad de aplicación de la carga inferior a 4 Tm/minuto. Las cargas en Tm y flechas mínimas en mm admisibles según perfil y calidad del carril son las siguientes:

	Calidad (MPa)	700	900	110	Flecha (mm)
	RN 45	42	-	-	9
PERFIL	UIC 54	63	75	85	9
	UIC 60	75	90	102	9

SOLDADURA ALUMINOTERMICA DE CARRILES

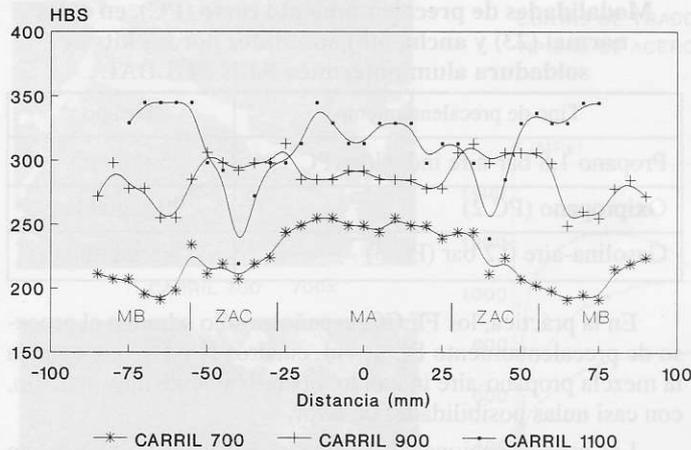


Fig. 3.-Perfiles de dureza longitudinales internos de uniones soldadas con las tres calidades de carril UIC 54.

La Fig. 5 representa los gráficos flecha-carga total soportada por tres probetas soldadas aluminotérmicamente de carriles 700, 900 y 1.100 MPa, perfil UIC-54. Es evidente que superan las cargas mínimas estipuladas y que las flechas a rotura rebasan los 9 mm.

La traducción de cargas absolutas en cargas unitarias en MPa para las tres calidades de carril empleadas son las siguientes:

Calidad (MPa) Perfil	700	900	1.100
RN 45	483	-	-
UIC 54	493	587	665
UIC 60	487	585	663

Cuadro III

Ventajas e inconvenientes de las distintas formas de precalentamiento en los sistemas PC y CA de KLK-SOLDAL

Tipo precalentamiento	Equipo	Ventajas	Inconvenientes
1 PROPANO 1,5 bar AIRE INDUCIDO PC 1	BOTELLA GLP 11 Kg + quemador 1	- Equipo barato y ligero - No pueden sobrepasarse los 450 °C - Gran facilidad de manejo - Errores casi imposibles	Tiempo 5 minutos
2 PROPANO 1,5 bar OXIGENO 5 bar PC 2	BOTELLA GLP 35 Kg BOTELLA OXIGENO 10 m ³ + quemador 2	- Gran rapidez - Tiempo de 1-2 minutos	Gran potencia calorífica Mal utilizado puede llegar a fundir el carril
3. GASOLINA AIRE 0,2 bar PC 3	COMPRESOR PALETAS + quemador 3	- En algunos países o lugares puede ser un problema disponer de propano - Tiempos de 3-5 minutos	Equipo caro y más pesado que los anteriores

Es decir, deberán soportar como mínimo una tensión equivalente al 60 %, aproximadamente, de la carga de rotura del carril. Las flechas de 9 mm estipuladas suelen alcanzarse para tensiones superiores a las especificadas en el cuadro anterior, cifradas en 600, 700 y 850 MPa para las soldaduras de carril normal, duro y extraduro, con independencia de la modalidad de precalentamiento empleada. Y las cargas de rotura de los cordones, habitualmente superiores, o equivalentes, a la de los carriles soldados, son sinónimo de la compacidad y ajuste del acero aluminotérmico.

- *Estructura del acero.* En la observación metalográfica a 700 x, la estructura deberá ser completamente perlítica (ferrito-perlítica para el carril 700) tanto en el metal de aporte como en las zonas afectadas por el calor, no aceptándose la presencia de constituyentes de no equilibrio (bainita-martensita). Se adjuntan macrografías, Fig. 6, de tres uniones soldadas en «carril 900» con las tres modalidades de precalentamiento empleadas. En todos los casos, las zonas de fusión superan los 5 mm exigidos por los FF.CC. españoles.

4. Conclusiones

- 1.- Los kits KLK-SOLDAL empleados para la modalidad PC, permiten un proceso de soldadura fácil y seguro, compatible con todas las tecnologías de equipos de precalentamiento corto actualmente utilizados, adecuándose holgadamente a las características exigidas por los FF.CC. españoles, también en lo que al control de calidad de las uniones soldadas (extracción de probetas para verificación de ensayos de dureza, flexión y metalografía) se refiere.
- 2.- Los kits de soldadura aluminotérmica investigados reúnen los requisitos de composición química y homogeneidad necesarios para garantizar, dentro del intervalo ± 20 , las cifras de dureza 260, 300 y 340 HBS, exigidas a las uniones entre carriles de resistencia 700, 900 y 1.100 MPa respectivamente.

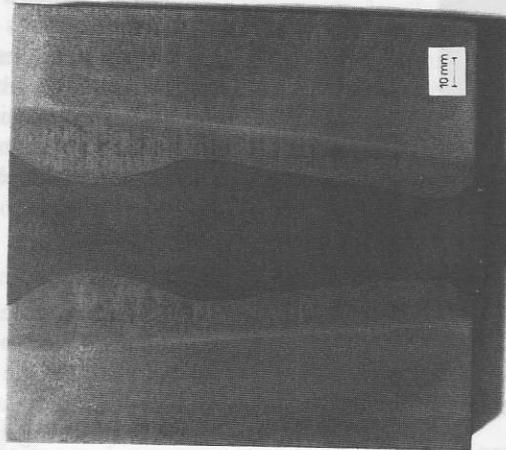


ZONA GLOBULAR



METAL BASE

Fig. 4
MACROGRAFIA DE UNION SOLDADA.
METALOGRAFIA DEL CORDON Y
ZONAS AFECTADAS POR EL CALOR.
ESTRUCTURAS PERLITICAS.



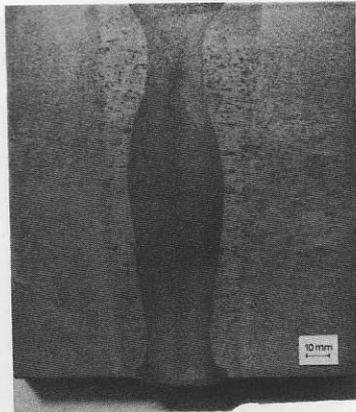
PC2



METAL DE APORTE



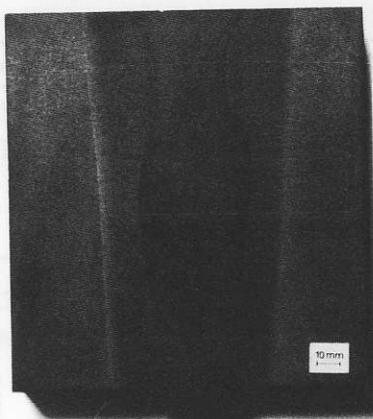
ZONA AFECTADA POR EL CALOR



PC 1



PC 2



PC 3

Fig. 6.-Macrografías de uniones soldadas con las tres modalidades de precalentamiento.

ENSAYOS DE FLEXION

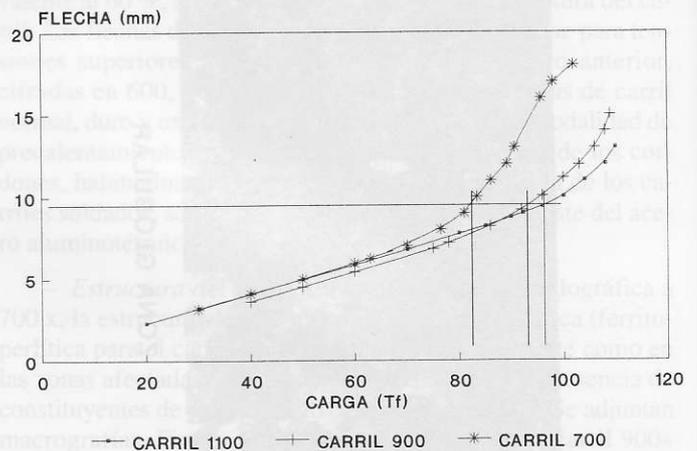


Fig. 5.-Curvas flecha-carga aplicada de uniones soldadas con las tres calidades de carril UIC 54.

3.-Los aceros aluminotérmicos, objeto de este trabajo, no solamente poseen una dureza afín, véase superior, a la de los carriles a soldar, sino que resultan, además, internamente sanos y de compacidad suficiente. Su estructura perlítica o ferrito-perlítica es correcta, sin constituyentes de no equilibrio (bainita-martensita). Por ambos motivos, compacidad y estructura adecuadas, en el ensayo de flexión, soportan cargas y admiten deformaciones superiores a las exigidas por los usuarios.

Agradecimientos

Los autores quieren hacer constar su agradecimiento al grupo de Empresas Electro Materiales K.L.K., S. A. y SOLDAL, S. A. en las personas 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» (1993). A D. Agustín Suárez-Valdés y D. Benjamín Fernández, de ENSIDESA, por su constante apoyo y colaboración. Finalmente, a D. José Ovidio García, Marta María Cabeza y Teresa Iglesias por su valiosa ayuda en el trabajo experimental y confección de este artículo.

Bibliografía

1. A. J. KEY. Met. Const., pp. 419-422 (1984).
2. J. O. GARCIA, M. A. HUERTA, J. I. VERDEJA. Rev. Minas, n.º 7, pp. 71-75 (1992).
3. RENFE. Pliegos de Condiciones RENFE - Vía P.R.V. 3-3-2.3. y N.R.V. 3-3-2.4. (1992).
4. INFORME N.º 930209, SOLDAL-ETSIMO (1993).
5. INFORMES N.º 930113 y 930204, ENSIDESA-SOLDAL-ETSIMO (1993).