

Carriles para alta velocidad. Comportamiento en fatiga^(*)

J.M. Duart*, J.A. Pero-Sanz** y J.I. Verdeja***

Resumen

En los últimos años la eficiencia de los FFCC., tanto para el transporte de viajeros como de mercancías, ha experimentado un desarrollo espectacular. Ello, ha sido posible gracias, entre otros factores, a la fabricación de carriles con resistencia al desgaste, carga de rotura y resistencia a fatiga mejoradas. La soldadura de los carriles, en Europa y U.S.A. se realiza "in situ" por aluminotermia con precalentamiento de los carriles con oxipropano o propano-aire inducido. Los ensayos de fatiga de los carriles soldados se llevan a cabo por flexión en cuatro puntos en concordancia con la norma europea. El método Locati, descrito en esta nota, está basado en la Ley de Miner de daño acumulado y en las curvas de Wöhler del material ensayado. Permite calcular, con precisión suficiente, las tensiones límites de fatiga al 50%. Así, los valores obtenidos, en ensayos a dos millones de ciclos, para carriles sin soldar ($S_f = 353$ MPa), carriles soldados con precalentamiento de oxipropano ($S_f = 225$ MPa) y carriles soldados con precalentamiento de propano-aire inducido ($S_f = 210$ MPa) son muy similares y aceptables a los estipulados por los métodos de determinación del límite de fatiga según norma europea. Debido a la comodidad, rapidez y bajo coste del método Locati resulta, en nuestra opinión, muy adecuado para el control de calidad de los procesos de soldadura aluminotérmica en vigor, de carriles de alta resistencia.

Palabras clave Aceros perlíticos. Soldadura aluminotérmica. Carriles. Resistencia a fatiga.

High speed rails. Fatigue behaviour**Abstract**

In recent years, passenger train speed and freight train load have increased to enhance efficiency of rail road transportation. These trends have increased the severity of rail service conditions, calling for rails with greater wear resistance, strength and fatigue behavior. In the United States and Europe, track site weld rails are made entirely by aluminothermic process. This work describe the results of experimental study conducted on bending fatigue strength of plain rails and aluminothermic welded rails with preheating procedures (oxipropane and air-induced propane) approved by railways authorities. Compliance with the required fatigue strength shall be ascertained by 4 point pulsating bending test in accordance with European standard by aluminothermic weld in rails. The Locati method, based in the empirical Miner's law about the cumulative damage on a fatigue tested material, allows, once known the Wöhler curve of the welding process in use to settle the fatigue tensile limit at 50% with only one test. The values obtained at $2 \cdot 10^6$ cycles for plain rails ($S_f = 353$ MPa), oxipropane preheated aluminothermic weld rails ($S_f = 225$ MPa), and propane-air induced aluminothermic weld rails ($S_f = 210$ MPa) are very similar to those resulting from test method stated in the European Standard. From our point of view and due to its ease, speediness and savings, this is the most suitable test to check the quality and compare the aluminothermic processes in use.

Keywords

Pearlitic steels. Aluminothermic weld. Rails. Fatigue behavior.

(*) Trabajo recibido el día 26 de julio de 2004 y aceptado en su forma final el día 7 de febrero de 2005.

(*) División de Soldadura Aluminotérmica, KLK Electromateriales. Apartado 333, 33211 Gijón, E-mail: jmduart@klk.es

(**) E.T.S.I. de Minas de Madrid. Dpto. de Materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Ríos Rosas 21, 28003 Madrid. E-mail: jperosanz@dim.upm.es

(***) E.T.S.I. de Minas de Oviedo Dpto. de Materiales. Universidad de Oviedo, Independencia 13, 33004 Oviedo. E-mail: metalotecnica@etsimo.uniovi.es

1. INTRODUCCIÓN

En una Nota Técnica publicada anteriormente^[1] se describían las ventajas y requerimientos necesarios para soldar aluminotérmicamente los carriles con la finalidad de obtener una “vía continua” (*continuous welded rails*). Las ventajas que presenta son obvias: mayor velocidad y estabilidad permisibles en los trenes, reducción de coste de mantenimiento y de pérdidas en el transporte de graneles (ferrocarriles mineros), menor consumo energético, etc.

En lo que a requerimientos se refiere debe comenzarse, pues, por diseñar aceros idóneos para los abundantes kilómetros de carril necesarios en FF.CC. –como ilustración casi 600.000 Km. en U.S.A.–. Hay que atender fundamentalmente a requerimientos de coste bajo y a propiedades en servicio tales como dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y buen comportamiento a fatiga. Desde el primer tren inglés a vapor, que cubrió el trayecto entre Stockton y Darlington a 18 Km/h (en 1825), el material de vía ha evolucionado extraordinariamente. Actualmente los carriles son de acero ferrito-perlítico, o perlítico; con alto contenido en carbono y perlita fina.

En aceros perlíticos y ferrito-perlíticos, los valores del límite elástico, R_e (en MPa), y carga de rotura, R_m (en MPa), pueden estimarse mediante las fórmulas^[2 y 3]:

$$R_e = f_\alpha^{1/3} (35,4 + 58,5\%Mn + 17,4 d^{-1/2}) + (1 - f_\alpha^{1/3})(178,6 + 3,9 \cdot S_0^{-1/2}) + 63,1\% Si$$

$$R_m = f_\alpha^{1/3} (246,4 + 18,2 d^{-1/2}) + (1 - f_\alpha^{1/3}) (720 + 3,5 \cdot S_0^{-1/2}) + 97\% Si$$

siendo f_α la fracción volumétrica de ferrita, d el tamaño de grano de la ferrita (en mm), S_0 el espaciado interlaminar de la perlita (en mm), Mn y Si los porcentajes de estos elementos solubilizados en la ferrita.

Adviértase que pequeñas fracciones de ferrita disminuyen rápidamente la R_m del acero (vinculada a la resistencia al desgaste y a la fatiga del carril). A modo de ejemplo, en un acero binario y 100 % perlítico la carga de rotura viene a ser: $R_m = 720 + 3,5 \cdot S_0^{-1/2}$. Por tanto, para el estado normalizado –bruto de laminación en caliente– de ese acero, con un espaciado interlaminar S_0 de 0,3 μm (0,0003 mm) resulta un valor de R_m igual a 922 MPa (“carriles duros” para líneas de alta velocidad) o de 1070 MPa (“carriles extraduros” para

tramos curvos, acoplamientos cruzamiento-vía y FF.CC. mineros) para $S_0 = 0,1 \mu\text{m}$ (0,0001 mm). El carril “de grado normal” –empleado para el servicio de trenes convencionales, 100 Km/h en tramos rectos, y cargas por eje inferiores a 25 Tf– tiene carga de rotura del orden de 700 MPa (calidad 700) y estructura ferrito-perlítica (10 % de ferrita proeutectoide aproximadamente). Los contenidos en manganeso y silicio se limitan por debajo del 1,3 y 0,3 %, respectivamente, para evitar problemas de enfragilización y templabilidad (aparición de constituyentes de no equilibrio: bainita, martensita y austenita retenida, tras laminación en caliente).

2. FATIGA

La causa más insidiosa –no fácilmente detectable– y frecuente de pérdida de resistencia mecánica e, incluso, de rotura en las piezas mecánicas que forman parte de una estructura –la vía es una estructura continua formada por carriles soldados– es la fatiga: nucleación y crecimiento de grietas en componentes sometidos a cargas variables con el tiempo (alternadas, repetidas, fluctuantes) que dan lugar a un “daño acumulado” –pérdida de sección resistente– que, al final, degenera en rotura. Sobre el carril, montado sobre traviesas pasan los ejes de las locomotoras y vagones, sometiéndole a un esfuerzo de flexión repetida –que origina tensiones de compresión en cabeza y de tracción en patín– que forzosamente repercute (aparte de otros fenómenos como desgaste, corrosión y sobrecargas) en la durabilidad del carril.

Históricamente, la fatiga fue originariamente detectada en los ferrocarriles: ejes de locomotoras, vagones y carriles, rotos en servicio por causas aparentemente desconocidas. De modo que las primeras investigaciones sobre el particular fueron llevadas a cabo, hace 150 años, por un empleado de los FF.CC. alemanes llamado August Wöhler (1819-1914). En 1854 fue promovido al cargo de Real Jefe Superior de máquinas del Estado de Prusia. Es, en esta época, cuando Wöhler realizó gran parte de la investigación sobre las causas de roturas de ejes, los efectos que producen las vibraciones en las ruedas, el cálculo de los esfuerzos de flexión y torsión en los ejes y la determinación de la carga de rotura en hierros (fundiciones) y aceros. De ahí, enunció las leyes que llevan su nombre:

La rotura del hierro y del acero tiene lugar, no solamente, cuando alcanzan su carga de rotura R_m ; sino también, bajo el efecto de cargas fluctuantes cuyo valor máximo puede ser muy inferior a R_m .

El número de ciclos de carga soportados por una pieza es tanto mayor cuanto menor sea la tensión máxima aplicada.

Las piezas mecánicas, sometidas a cargas variables con el tiempo –por ejemplo ejes, vástagos de émbolos y bielas– deben tener una resistencia 9/5 veces superior que aquellas que están sometidas a carga constante –vigas y cerchas, por ejemplo–^[4].

Muchas publicaciones son muestra de la intensa y polivalente actividad que Wöhler desarrolló en el área de los FFCC. El gran mérito de Wöhler es haber establecido en su momento las bases del saber y del conocimiento técnico modernos sobre los fenómenos de fatiga, la importancia decisiva de sus ensayos –aplicables a la generalidad de los materiales estructurales– y el haber llevado a cabo, de un modo práctico, estos conocimientos^[5].

Así, surgieron las denominadas curvas de Wöhler o curvas S-N (Fig. 1): representan, en ordenadas, la tensión máxima aplicada en cada ciclo de carga (S, stress) y, en abscisas, N, el número de ciclos de carga soportados por la probeta o componente (N, number of cycles). La curva tiene forma de “cola de perro” (*tail dog*): descendente primero y asintóticamente horizontal después, a partir de un determinado número de ciclos, habitualmente comprendido en los materiales féreos, entre 2 y 10 millones de ciclos^[6] (Fig. 2). La tensión S_f correspondiente a dicho palier se denomina tensión límite de fatiga: un 50 % de las piezas romperían bajo dicha tensión al cabo de un número indefinido de ciclos. Aplicando las leyes estadísticas –distribución normal de Gauss–, el concepto de valor medio, m , y desviación típica, s , llegaríamos a la conclusión de que, sólo un 16% de componentes romperían bajo una tensión de S_f-s , un 2,5 % bajo

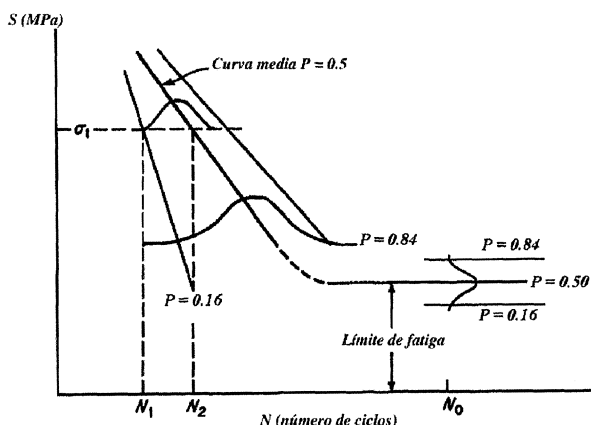


Figura 1. Curvas Wöhler S - N (tensión - número de ciclos).

Figure 1. Wöhler curves Stress - Number of cycles.

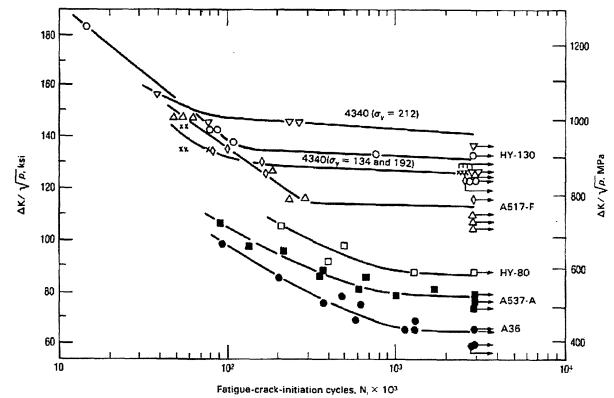


Figura 2. Curvas de Wöhler de varios tipos de aceros (6).

Figure 2. Fatigue - crack - initiation behaviour of various steels at a stress ratio of + 0.1 (6).

una tensión S_f-2s y menos del 1 % bajo una tensión S_f-3s : el 99 % de las piezas alcanzarían una vida ilimitada, de no surgir los “imponderables” anteriormente citados^[7].

La rotura de carriles por fatiga puede ser causa, obviamente, de graves accidentes; debe, estrictamente, evitarse efectuando la reposición periódica de vías y tramos más cargados. Un caso particularmente grave son las roturas por fatiga iniciadas en el patín, con forma de “uñas de dedo” (*thumb nail*), de coloración oscura, iniciada habitualmente a partir de un defecto inicial (decarburation superficial, entallas, microgrietas de enfriamiento, etc.). Una vez alcanzado su tamaño crítico, el carril rompe catastróficamente, pudiendo desprenderse un fragmento superior del mismo –biselado desde la cabeza hacia el alma– que es origen de descarrilamiento inmediato (Fig. 3). Para evitarlo, debe procurarse que el patín no soporte tensiones superiores a S_f-3s (tensión límite de fatiga al 50 %, menos tres veces la desviación típica deducida de ensayos de fatiga) durante el tiempo en servicio –vida del carril– diseñado, que dependerá, lógicamente, de la carga por eje y del tráfico soportado por la vía.

Se adjuntan las nubes de puntos experimentales (S, N) –obtenidas por Allen y Milne^[8] de British Railways– (Fig. 4) de carriles duros –900 MPa de carga de rotura y microestructura perlítica– y de esos mismos carriles soldados aluminotérmicamente, bien con precalentamiento de oxipropano, bien precalentados con propano-aire inducido^[11]. Ya se puede intuir, de la distribución de puntos (S, N) que $(S_f)_{carril} > (S_f)_{soldadura}$. La estructura forjada del carril siempre será más resistente a fatiga que la estructura moldeada de la soldadura, atendiendo a la propia naturaleza y consecuencias que se derivan



Figura 3. Rotura por fatiga de un carril UIC - 60 - 900

Figure 3. Surface fracture of a UIC - 60 - 900 rail broken by fatigue

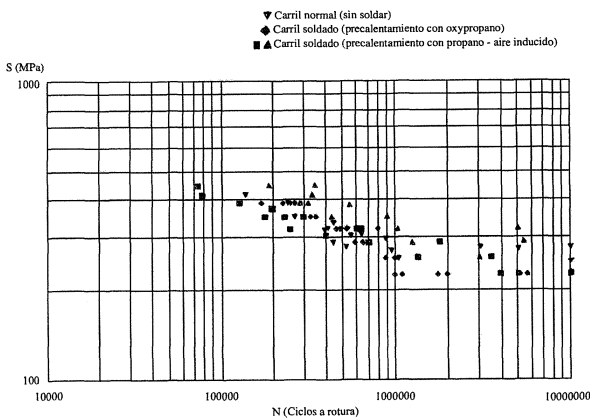


Figura 4. Puntos (S - N) de carriles con y sin soldadura aluminotérmica (8).

Figure 4. Fatigue data points of rails and aluminothermic welded rails. By courtesy of Allen and Milne (8).

de las operaciones de forja (carril laminado) y moldeo (metal de aporte del carril soldado). De modo que el diseño de cargas y tiempo en servicio deberá hacerse en base al segundo elemento de la vía continua, la soldadura. Veamos a continuación, como puede llegarse a estimar de modo simplificado y esquemático la tensión S_f de trabajo de carriles soldados.

La experiencia europea de reposiciones de vía –en redes de primera categoría– se considera necesaria tras el paso de $300 \cdot 10^6$ Tm; lo que para una carga por eje rodante de 30Tm, llevaría a 10 millones de ciclos carga-descarga sobre la vía continua carril-soldadura-carril. Esta debería ser la duración de un ensayo acelerado de fatiga. Pero en la curva S-N de Wöhler en aceros, la experiencia muestra –como hemos indicado anteriormente– que el límite de fatiga se alcanza habitualmente al cabo de $5 \cdot 10^6$ ciclos, e incluso de $2 \cdot 10^6$ ciclos (Fig. 5); lo cual abarata y acorta sustancialmente los ensayos de más de una semana a dos-tres días con las máquinas de ensayos actualmente disponibles. Por otro lado, con carga de 30 Tm/eje, la tensión máxima soportada por el patín de un carril UIC 60-900 (60 Kg/m, $R_m = 900$ MPa) sería del orden de 100 MPa. Añádase 50 MPa de “tensiones internas” acumuladas en el proceso de enderezado y soldadura del carril^[9 y 10]. Ello equivale a una tensión de trabajo de 150 MPa. Puede demostrarse que, con suficiente número de ensayos de fatiga, la desviación estándar, no suele superar los 20 MPa^[11]. Por tanto la tensión límite de fatiga del carril soldado sería $150 + 3 \cdot 20 \approx 210$ MPa. Con otras palabras, el carril soldado tendría una duración cuasi-indefinida (99 % de no fallos de rotura por fatiga) si la tensión máxima de trabajo no supera los 210 MPa durante dos millones de ciclos. Lo que requiere un particular esmero en la tecnología de soldadura “in situ” de carriles efectuada por métodos aluminotérmicos^[1 y 10].

3. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE FATIGA. ENSAYO LOCATI

El ensayo Locati es un método experimental rápido y barato para determinar la tensión límite de

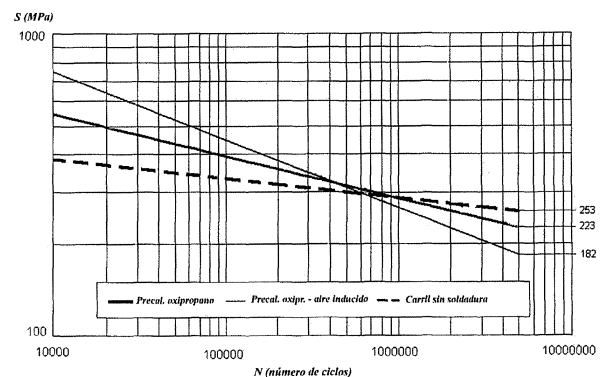


Figura 5. Regresión en coordenadas doble - logarítmicas (log S - log N) de los ensayos de fatiga recogidos en la Fig. 4. Curvas de Wöhler.

Figure 5. Wöhler curves of data points collected in figure 4.

fatiga, S_f de un material, cuya curva de Wöhler y dispersión estadística, m , se conocen. Tarda en ejecutarse un día, aproximadamente, y asegura el control de calidad –en nuestro caso de la soldadura– del material ensayado^[12 y 13]. Está basado en la aplicación de una tensión máxima, escalonadamente creciente, a partir de un valor supuesto ligeramente inferior al límite de fatiga requerido, durante un número constante de ciclos, habitualmente 10^5 . La sucesión de S_{max} escogida fue 180, 200, 220 MPa, etc. En progresión aritmética de $\Delta S = 20$ MPa, hasta rotura. La tensión mínima en cada escalón es $0,1 S_{max}$.

Se verifica, para la determinación del límite de fatiga, la ley de Miner de daño acumulado, por la

cual: $\sum \frac{n_i}{N} = 1$, donde,

n_i : número de ciclos ensayados a S_i (10^5)

N_i : número de ciclos a rotura para S_i (determinado sobre las curvas de Wöhler).

Situando los puntos obtenidos dentro de la banda experimental de Wöhler del material, resultaría:

$\sum \frac{n_i}{N} < 1$ para la curva de Wöhler $S_f - s$

$\sum \frac{n_i}{N} \approx 1$ para la curva de Wöhler S_f

$\sum \frac{n_i}{N} > 1$ para la curva de Wöhler $S_f + s$

El valor estadístico correcto de S_f correspondería a un daño acumulado: $\sum \frac{n_i}{N} = 1$, accesible por

regresión parabólica de los tres valores anteriormente reseñados.

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en una máquina servohidráulica para ensayos estáticos y dinámicos de 1000 KN (100 Tf) de capacidad. La disposición geométrica del ensayo de flexión simétrica en cuatro puntos, consistió en establecer una luz mayor entre apoyos pasivos de 1.000 mm; y una luz menor –entre apoyos activos de luz centrada– de 150 mm (Fig. 6)^[14]. La relación entre las cargas aplicadas por la máquina F y las tensiones máximas originadas en el carril y/o soldadura, σ , se obtuvieron a partir de la fórmula de Navier:

$$F = \frac{4\sigma W}{L_1 - L_2} \quad \text{siendo,}$$

W, módulo resistente del carril: 377 cm^3

L_1 , distancia entre apoyos extremos: 1.000 mm.

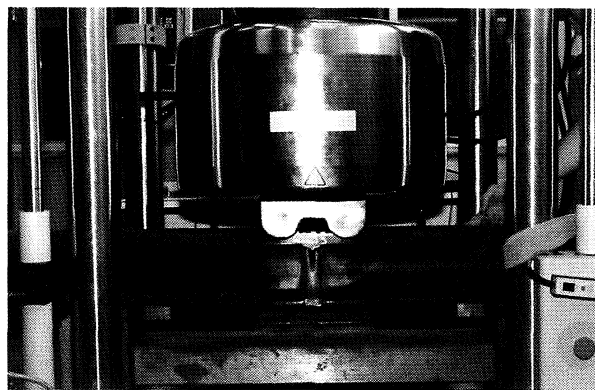


Figura 6. Realización del ensayo de fatiga. Cortesía de LADICIM (14).

Figure 6. Testing by fatigue an aluminothermic welded rail. By courtesy of LADICIM (14).

L_2 , distancia entre apoyos centrales bifurcados: 150 mm.

La frecuencia de solicitación depende de la carga aplicada: varió entre 1,5 y 10 Hz.

Las figuras 7, 8 y 9 combinan las bandas de Wöhler y el ensayo Locati de un carril sin soldadura, de un carril soldado aluminotérmicamente, con precalentamiento oxipropano y de un carril soldado aluminotérmicamente, con precalentamiento propano-aire inducido. Todos ellos perfil y grado UIC 60-900^[15].

3.1. Carril de origen, sin soldar

La regresión estadística efectuada a partir de los ensayos efectuados por Allen y col. (8), permiten obtener la banda Wöhler definida por la ecuación $\lg S + 0,18 \lg N_f = 3,66 \pm 0,04$ (Fig. 7).

La muestra de carril rompió en el ciclo 1.589.000 correspondiente al escalón de tensión máxima aplicada de $S = 480$ MPa.

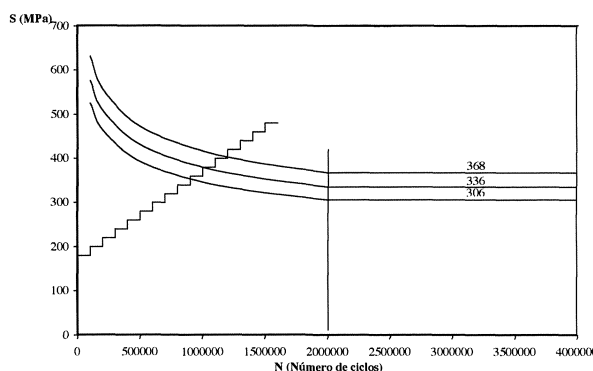


Figura 7. Curvas Wöhler y ensayo Locati del carril.

Figure 7. Stepped load process for determine the fatigue strength using Locati test. Plain rail.

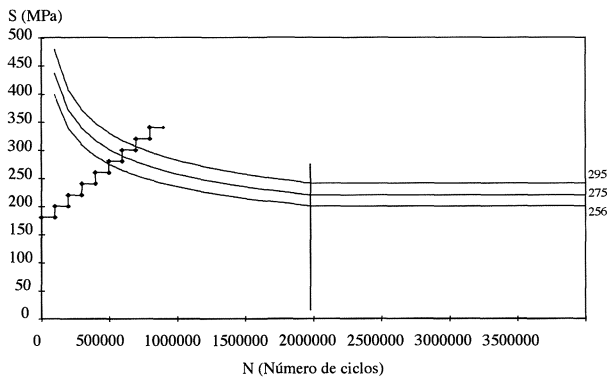


Figura 8. Curva de Wöhler y ensayo Locati del carril soldado aluminotérmicamente, precalentado con oxipropano.

Figure 8. Ibidem Figure 7. Oxipropane preheated aluminothermic welded rail.

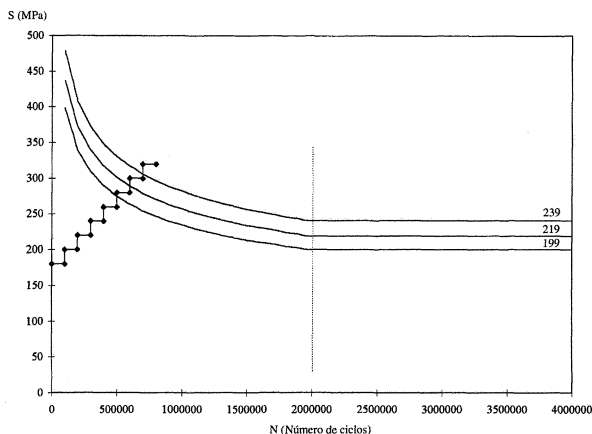


Figura 9. Curva de Wöhler y ensayo Locati del carril soldado aluminotérmicamente, precalentado con propano - aire inducido.

Figure 9. Ibidem Figure 7. Propane - air induced preheated aluminothermic welded rail.

Los pares de valores (límite de fatiga, daño acumulado) resultaron ser (306, 2.36), (340, 1.32) y (368, 0.74).

De lo que se deduce un límite de fatiga de 353 MPa para el carril ensayado 2 millones de ciclos. La extrapolación de la curva de Wöhler arrastraría un límite de fatiga de 285 MPa a $5 \cdot 10^6$ ciclos y de 251 MPa a 10^7 ciclos respectivamente; caso de que el límite de fatiga no se hubiese alcanzado a 2 millones de ciclos.

3.2. Carril soldado con precalentamiento oxipropano

Similarmente al caso anterior, se calculó la banda de Wöhler de la soldadura. Se ajusta a la ecuación:

$$\text{Lg } S + 0,14 \text{ lg } N_f = 3,32 \pm 0,03 \text{ (Fig. 8)}$$

La probeta soldada rompió al cabo de 868.000 ciclos correspondiente al escalón de tensión máxima aplicada de $S = 340$ MPa

Efectuado el análisis de Miner, los pares de valores (límite de fatiga, daño acumulado), fueron (256, 0.83), (275, 0.47) y (295, 0.25).

Deduciendo un límite de fatiga de 225 MPa para la soldadura ensayada a dos millones de ciclos. La extrapolación de la banda de Wöhler a $5 \cdot 10^6$ ciclos conllevaría un descenso del límite de fatiga a 218 MPa y a 198 MPa (aceptable) con diez millones de ciclos.

3.3. Carril soldado con precalentamiento propano-aire inducido

Siguiendo una sistemática análoga a las anteriores, la banda de Wöhler de la soldadura viene definida por la ecuación:

$$\text{Lg } S + 0,23 \text{ lg } N_f = 3,79 \pm 0,04 \text{ (Fig. 9)}$$

El cupón soldado rompió al cabo de 793.000 ciclos correspondiente al escalón de tensión máxima aplicada de $S = 320$ MPa.

Los pares de valores (límite de fatiga, daño acumulado) fueron (200, 1,26), (219, 0,82) y (240, 0,46).

De lo que se deduce un límite de fatiga de 210 MPa para la soldadura ensayada a 2 millones de ciclos. La extrapolación de la curva de Wöhler comportaría un límite de fatiga de 172 MPa a $5 \cdot 10^6$ ciclos e inferior a 150 MPa (inaceptable) a 10^7 ciclos.

4. CONCLUSIONES

- El ensayo de fatiga de carriles soldados aluminotérmicamente constituye el ensayo más estricto, la piedra de toque para verificar la compacidad interna y externa de la soldadura y el diseño apropiado del cordón, con geometría y radios de acuerdo suficientes para evitar o retrasar la incubación de grietas.
- Conocidas las curvas de Wöhler de los carriles sin soldar y de los carriles soldados, según procesos aluminotérmicos aprobados por las autoridades ferroviarias, el ensayo Locati es un método rápido, barato y eficaz para determinar el límite de fatiga de los perfiles experimentados y su adecuación o no a los requerimientos de

control de calidad y de la norma europea CEN TC 256 WG 4 (Aluminothermic Welding process for heavy rails).

- El carril soldado con precalentamiento de oxipropano posee un límite de fatiga $S_f = 225$ MPa, ligeramente superior al del carril soldado con precalentamiento de propano-aire inducido $S_f = 210$ MPa. El precalentamiento en el primer caso ($T \approx 600$ °C) es más corto y enérgico que el segundo ($T \approx 400$ °C). Tiene el inconveniente – precalentamiento con oxipropano- que, por defecto de ejecución, pueden llegar a fundirse los puntos de los carriles; el segundo –precalentamiento con propano/aire inducido- tiene la ventaja de ser más seguro ante una mala ejecución; y el inconveniente de proporcionar zonas de fusión más estrechas y, por tanto, límites de fatiga más bajos que las soldaduras precalentadas con oxipropano; pero dentro de norma: es el procedimiento actualmente aceptado por RENFE y países del área francesa.
- El carril sin soldar, UIC 60-900 y equivalentes, poseen límites de fatiga, $S_f = 350$ MPa, claramente superiores a los carriles soldados con los procedimientos en uso. Con materiales y geometrías equivalentes, las piezas forjadas poseen mejores características físicas (ausencia de porosidad, microrrechupes y faltas de fusión), químicas (consecuencia de las macro y microsegregaciones) y mecánicas (mayor resistencia y tenacidad), que las moldeadas. Y, dentro de las moldeadas (es el caso de la soldadura de carriles), el ensayo de fatiga marca el nivel máximo admisible de defectos para un comportamiento en servicio correcto.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a D. Julio Rubio Cueli, Director General de KLK-Electromateriales y D. Sergio Tamargo Fernández,

por la colaboración y ayuda prestada en los procesos de soldadura aluminotérmica. A D. José Ovidio García García y Doña Teresa Iglesias García su ayuda en el trabajo experimental y confección del texto. Finalmente a FICYT-Principado de Asturias, la financiación de los Proyectos “Nuevos aceros para FF.CC”. y “Soldadura aluminotérmica de carriles de alta resistencia”.

REFERENCIAS

- [1] J.M. DUART, J.A. PERO-SANZ y L.F. VERDEJA, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 56-64.
- [2] J.A. PERO-SANZ, F. MENÉNDEZ y J.I. VERDEJA, *ETSIMM 1*, Fund. Gómez-Pardo (2004) 53-58.
- [3] J.A. PERO-SANZ, *Aceros. Metalurgia Física, Selección y Diseño CIE Dossat*, Madrid (2004) 331-342.
- [4] A. WÖHLER (nota necrológica), *Vgl Zentralblatt der Bauverwaltung* (1914) 18.
- [5] J.E. GORDON, *Structures*, Penguin Books, New York (1978) 325-353.
- [6] R.C. ANDERSON, *Metals Handbook Desk Edition* ASM, Ohio-USA (1985) 32.1-32.32.
- [7] G.E. DIETER, *Mechanical Metallurgy*, Second Edition, McGraw-Hill Int. Co. Tokyo (1981) 406-411.
- [8] R.J. ALLEN y J.K. MILNE, *Comunicación privada. British Railways*, Londres (1997).
- [9] K. UCHINO *et al.*, *Nip. St. Tech. Report n° 53*, Yawata Japón (1992) 9-16.
- [10] A.M. ZAREMBSKI, *railway Track and Structures*, New York, USA (1992) 21-28.
- [11] J.I. VERDEJA, D. PLAZA y J.A. PERO-SANZ, *Micros. Sc.* 26, ASM-IMS Ed. OHIO – USA (1999) 31-35.
- [12] R. CAZAUD, *La Fatigue des Métaux*. 4^{ème} Edition, Dunod. París (1959) 105-121.
- [13] P. LIEURADE, *La Rupture par Fatigue des Aciers*. 13th Edition IRSID-OTUA París (1979) 22-28.
- [14] J.A. POLANCO, *Informes LADICIM 96100, 98008 y 98029*. ETSICCP de Santander (1998).
- [15] A. ALFONSO, *Comunicación privada ETSIMO* (2000).