

TENACIDAD A LA FRACTURA Y RESISTENCIA DE GRIETAS POR FATIGA DE ACEROS UTILIZADOS EN LA FABRICACION DE CARRIL

C. Rodríguez*, F. J. Belzunce** y J.L.González*

* Instituto Tecnológico de Materiales (ITMA),
Parque tecnológico, 33428 Llanera

** Departamento de Ciencia de Materiales (Universidad de Oviedo),
E.T.S.I.Industriales, Ctra. de Castiello s/n, 33204 Gijón

Resumen. En este trabajo se realiza el estudio de los aceros perlíticos, al carbono y de baja y media aleación, habitualmente utilizados en la fabricación de carril para uso ferroviario, que en virtud de las cada vez más exigentes condiciones de servicio deben asegurar un buen comportamiento a fatiga y una elevada tenacidad. Se ha relacionado la composición química, la microestructura y las propiedades mecánicas convencionales de estos productos (todas ellas afectadas por el proceso de fabricación) con su comportamiento en presencia de defectos: tenacidad a la fractura y velocidad de crecimiento de grietas por fatiga. El objetivo final es lograr productos que presten un servicio más seguro.

Abstract. This paper is devoted to the study of carbon and low-alloyed pearlitic steels used to make railway rails, which are submitted to increasingly hard service conditions and have to assure a good fatigue behaviour and high toughness. Their chemical composition, microstructure, and tensile properties (all them affected by the manufacturing method) have been related to their fracture toughness and fatigue crack growth rate. The final aim is to obtain more reliable products.

1. INTRODUCCION

Los aceros de carril son unos productos de gran interés industrial en virtud de sus producciones masivas, fiabilidad y el alto nivel de calidad que se está exigiendo en la actualidad con el fin de evitar fallos en servicio.

Uno de los problemas más graves es la fractura frágil del carril, que normalmente va precedida por el crecimiento de una grieta mediante un proceso de fatiga. Lógicamente, se trata de un riesgo que es necesario limitar ya que ocasiona, en el mejor de los casos, gastos debidos al reemplazo de la longitud de carril roto y gastos de inspección para buscar grietas de fatiga, pudiendo incluso originar problemas mucho más graves (afortunadamente ocurren raramente), como sería el descarrilamiento del tren. Este tipo de fallos ha sido valorado en E.E.U.U. en 100 millones de dólares anuales [1]. De cualquier manera, como las velocidades de los trenes están aumentando considerablemente (trenes de alta velocidad, por ejemplo), las cargas que soportan se incrementan igualmente (mayores cargas sobre los ejes de los vehículos), y las exigencias en cuanto a seguridad son más estrictas, los problemas que se acaban de exponer tienen cada vez una mayor trascendencia, y de ahí surge la necesidad imperiosa de conocer con la mayor precisión los factores que influyen en la ocurrencia de los citados fallos, con el fin de evitarlos.

Por otro lado, en el momento actual, es necesario desarrollar nuevas calidades de carril y nuevos procesos de fabricación, de forma que se garantice en todo momento el adecuado comportamiento de este producto en las más exigentes condiciones de servicio. Sin embargo, la resistencia a la fatiga y a la fractura no son los únicos requisitos que debe satisfacer este producto. Otras propiedades de interés que no deben olvidarse son la resistencia al desgaste, a la deformación (alto límite elástico), soldabilidad, precisión y estabilidad dimensional, rectitud y bajo coste [2].

2. DEFECTOS DE LOS CARRILES

Progresos en el diseño y fabricación de los carriles y en las operaciones de mantenimiento han eliminado prácticamente muchos de los defectos que habían preocupado mucho en el curso de las últimas décadas. Sin embargo estudios realizados entre 1975-85 han identificado cuatro defectos característicos que todavía aparecen de un modo significativo. El primero de ellos es típico de los carriles soldados en continuo, y en más de un 30% de los casos está provocado por un control ineficiente de los procesos de soldeo en campo. Los otros tres tipos de defectos son el resultado de la nucleación y crecimiento de grietas por fatiga, y



corresponden a grietas nucleadas en los agujeros de los carriles unidos por pernos, grietas verticales y grietas transversales ovaladas en cabeza. Al ser defectos nucleados por fatiga, el número de ellos crece con las toneladas de tráfico acumuladas en el carril [3].

Por otro lado, el desgaste de la superficie del carril ha constituido el límite principal de la vida de éstos, especialmente en los tramos curvos. Sin embargo la optimización de sus composiciones químicas y la ejecución de tratamientos térmicos para lograr una dureza superficial en torno a 300-350 HB (frente a 250-280 HB) combinados con una mejor lubricación del contacto rueda-carril, han incrementado la vida a desgaste de tal manera que en el momento actual la fatiga es el factor que limita la vida de estos elementos en las más exigentes condiciones de trabajo[3].

En el curso de los últimos años se han venido utilizando análisis basados en la mecánica de la fractura para estimar la vida de los carriles bajo las cargas reales de servicio, modelizando los diferentes defectos relatados más atrás. Por otro lado, como la generación de datos en campo resulta muy larga y costosa es necesario recurrir a ensayos de laboratorio que permitan, por un lado, determinar la leyes de crecimiento de grietas por fatiga de los materiales de los carriles y sus cargas límites, y por otro, simular las condiciones de servicio de una manera más rápida y barata. En estos cálculos es necesario utilizar con la mayor precisión posible las tensiones reales que actúan en el curso del servicio del carril, que consisten en una componente mecánica - normalmente debida a la flexión del carril bajo la carga de la rueda-, tensiones térmicas y residuales [4].

En este trabajo se han evaluado y comparado entre sí la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga y la tenacidad a la fractura de carriles de diferente composición química. Se ha puesto asimismo de manifiesto que estas propiedades, siendo muy dependientes de la microestructura, varían en las diferentes zonas constitutivas del carril (cabeza, alma y pie) dada su distinta velocidad de enfriamiento tras laminación en caliente.

3. MATERIALES Y PROPIEDADES MECANICAS CONVENCIONALES

Los materiales utilizados en este trabajo han sido tres tipos de carriles de acero de 60Kg/m que denominaremos N°1, N°2 y N° 3 y que únicamente se diferencian en el contenido en aleantes de cada uno de ellos. La composición química de estos materiales se muestra en la Tabla 1. Por su parte, el estudio metalográfico realizado reveló en todos ellos una estructura totalmente perlítica, tanto en la cabeza como en el pie del rail (ver Figura 1). Sin embargo, el alma del carril, mostraba una microestructura con ferrita en borde de grano en el caso de las carriles N°1 y N°2 y con bandas de martensita dispuestas en dirección vertical y dispersas en la matriz perlítica (Figura 2) en el caso del carril N°3. La diferente microestructura mostrada por el alma de los carriles se

debe a que por un lado, tras la laminación en caliente, esta zona se enfría más rápidamente que las otras dos regiones (cabeza y pie), y por otro lado, a la presencia, sobre todo en su zona central, de una estructura ligeramente segregada. Conviene señalar que la presencia de esta zona segregada era mucho más notable en los carriles más aleados.

Carril	N°1	N°2	N°3
%C	0.72	0.73	0.72
%Si	0.25	0.28	0.27
%Mn	1.10	0.94	0.77
%Cr	---	0.28	0.52
%Mo	---	0.08	0.18
%V	---	0.07	0.10

Tabla 1. Composición química de los carriles

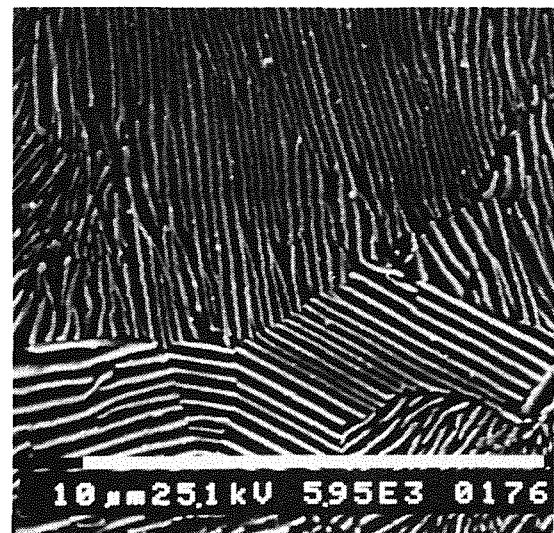


Fig.1. Microestructura perlítica de los carriles



Fig.2. Microestructura del alma del carril N°3

La Tabla 2, por su parte, muestra los resultados obtenidos en los ensayos de dureza realizados en las tres zonas características (cabeza, alma y pie) del carril.

Carril	Nº1	Nº2	Nº3
Cabeza	271	310	343
Alma	284	333	398
Pie	279	320	360

Tabla 2. Durezas HV10

Como puede observarse la dureza crece conforme lo hace el contenido en aleantes del carril, poniéndose de manifiesto, asimismo, la presencia de una zona segregada en el alma, que muestra siempre una mayor dureza que el resto de las partes del carril.

Por su parte, y con objeto de conocer las propiedades mecánicas convencionales de los carriles se realizaron ensayos de tracción a temperatura ambiente sobre probetas extraídas en dirección longitudinal de la cabeza del carril y en dirección tanto longitudinal como vertical en el alma del mismo. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Carril	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)
Nº1 (Cabeza)	480	950	12
Nº2 (Cabeza)	628	1074	11
Nº2 (Alma Vert.)	695	1118	9
Nº2 (Alma Long.)	670	1113	12
Nº3 (Cabeza)	740	1115	10
Nº3 (Alma Vert.)	870	1250	8

Tabla 3. Propiedades mecánicas a tracción

Como puede observarse, al igual que la dureza, tanto el límite elástico como la resistencia a la tracción de estos aceros crecen con su contenido en aleantes, decreciendo lógicamente el alargamiento de los mismos. Además, las diferencias en los resultados obtenidos en cabeza y alma del carril ponen de nuevo de manifiesto la enorme dependencia de la microestructura que muestran todas estas propiedades.

4. PROPIEDADES MECANICAS A FRACTURA

Con objeto de determinar las propiedades mecánicas a fractura de estos materiales, se han realizado ensayos tanto de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga como de tenacidad a la fractura, siguiendo las especificaciones de la Propuesta de Norma "DRAFT EUROPEAN RAILS STANDARD, Part1: Flat Bottom Simetrical railway Rails 46 Kg/metre and above".

4.1. Ensayos de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga

Para la realización de estos ensayos se utilizaron probetas de flexión en tres puntos con una simple entalla lateral (SENB) que fueron extraídas en dirección longitudinal en la cabeza del carril, mientras que en la zona del alma la extracción se produjo en dirección

vertical. La dirección de crecimiento de las grietas fué perpendicular a la de laminación en todas las probetas extraídas de la cabeza y en las del alma del carril Nº3, mientras que en las probetas del alma del carril Nº2, la dirección de crecimiento era paralela a la de laminación. La localización y geometría de estas probetas se muestran en la Figura 3. Las probetas mecanizadas a partir de la cabeza tenían un ancho (W) de 45 mm y un espesor de 20 mm, mientras que las del alma del carril, tanto en una dirección como en otra, eran de sección cuadrada con un ancho de 15 mm, debido a la mayor esbeltez del alma con respecto a la cabeza. La separación entre apoyos utilizada fué de cuatro veces el ancho de la probeta (S=4W) en todos los casos.

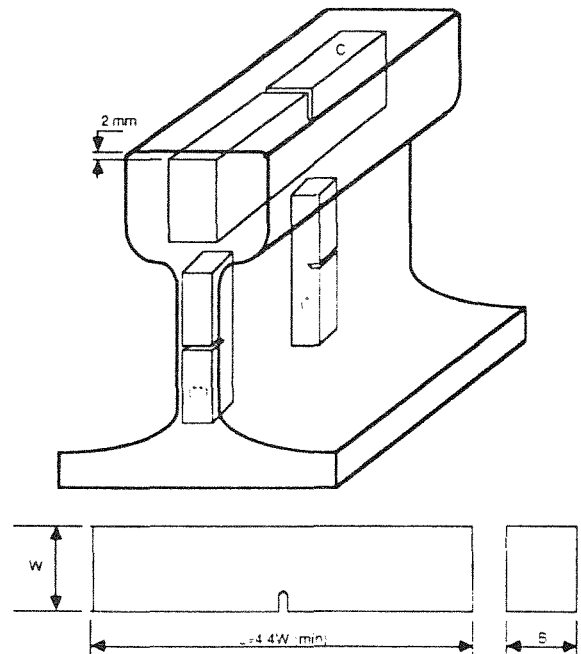


Fig.3. Localización y geometría de las probetas SENB

Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente y en control de carga con una relación de cargas R=0.5 en el caso de los carriles Nº1 y Nº3 y de 0.1 en el caso del carril Nº2. La frecuencia de ciclado adoptada fué de 30 Hz en todos los casos. Para la medida del crecimiento de la grieta se utilizó un extensómetro tipo COD que colocado en la boca de la entalla detectaba cada incremento de la longitud de la grieta por cambios en la flexibilidad de la probeta.

La Figura 4 muestra, en coordenadas doblemente logarítmicas, la ley de comportamiento en la zona de crecimiento estable de las grietas (ley de Paris) de las probetas extraídas de la cabeza de los carriles Nº1 y Nº3. Como puede observarse el carril aleado (Nº3) muestra mayores velocidades de crecimiento de grietas, en la zona de crecimiento estable, que el carril sin alea.

siendo, sin embargo, las pendientes de las rectas de Paris, muy similares en ambos casos.

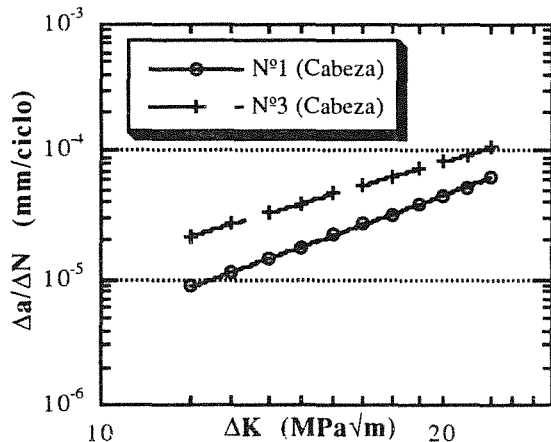


Fig.4. Curvas de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en cabeza. Ley de Paris.

Si comparamos ahora los valores obtenidos con las probetas extraídas de la cabeza y del alma del carril más aleado (Figura 5), observamos un comportamiento muy diferente en un caso y en otro. Así, a excepción de los valores menores de ΔK , cualquier grieta presente en el alma del carril crecería mucho más rápidamente que si se encontrase en la zona de la cabeza. Dado que la dirección de crecimiento de las grietas era en ambos casos perpendicular a la de laminación, parece lógico achacar esta diferencia de comportamiento únicamente al hecho de que las grietas avanzan a través de diferentes microestructuras.

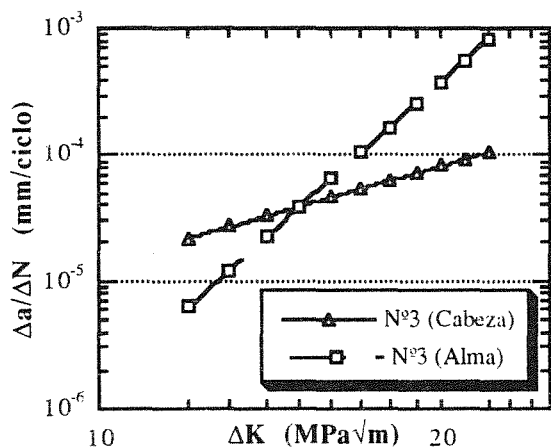


Fig.5. Curvas de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en carril N°3.

Esta apreciación también se hace evidente en el caso del carril N°2 (Figura 6), aunque lógicamente la diferencia de comportamientos ya no es tan notable como en el caso anterior, debido al hecho de que al ser éste un carril

menos aleado que el N°3, la zona del alma presentará una estructura más similar a la de cabeza. Tengamos en cuenta además, que en el caso del carril N°2, la dirección de propagación de las grietas era diferente según se tratase de probetas extraídas del alma (crecían en dirección paralela a la de laminación) ó de la cabeza (el crecimiento era perpendicular a la dirección de laminación) y que este hecho debería también influir en que la velocidad de crecimiento de grietas sea superior en el alma del carril. Teniendo en cuenta, sin embargo, de que la diferencia más notable, en cuanto a velocidad de crecimiento de grietas por fatiga se refiere, entre alma y cabeza se observe sin embargo en el carril N°3, en el cual la dirección de propagación de las grietas era en ambos casos perpendicular a la de laminación pero que no obstante era el que presentaba una mayor diferencia microestructural entre sus partes, incluye también a la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en el grupo de las propiedades que se ven fuertemente influenciadas por la microestructura del producto.

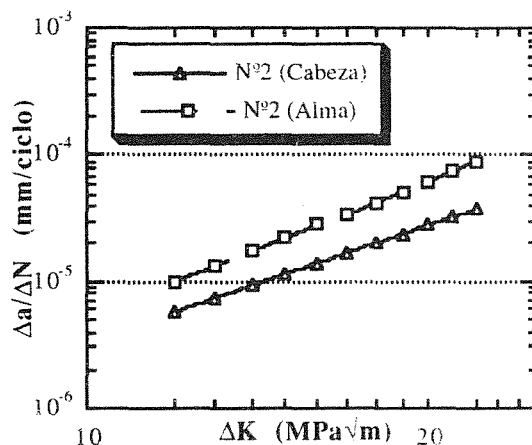


Fig.6. Curvas de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en carril N°2.

4.2. Ensayos de tenacidad a la fractura

Los ensayos de tenacidad a la fractura, fueron realizados sobre probetas de flexión en tres puntos de la misma geometría que las de crecimiento de grietas por fatiga. El tamaño de las probetas, sin embargo, era el mismo que en el caso anterior únicamente para las extraídas del alma de los carriles, mientras que en la zona de la cabeza el ancho de las probetas era de 40 mm, y el espesor de 25 mm, siguiendo las recomendaciones de la Propuesta de Norma anteriormente citada. El preagrietamiento por fatiga fué realizado en control de carga con una frecuencia de ciclado de 30 Hz y a temperatura ambiente, mientras que los ensayos de fractura se realizaron a una temperatura de -20°C .

En la Tabla 4 se muestra el valor medio de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos. En general los ensayos realizados no cumplen la condición

$P_{m\acute{a}x}/PQ < 1.1$, pero la raz3n de este incumplimiento no es por que tenga lugar plastificaci3n alguna en el frente de la grieta, sin3 del hecho (ya constatado durante el proceso de preagrietamiento) de que el frente de la fisura se había extendido de forma irregular, presentando un perfil en forma de "lengua" que parece ser t3pico en estos materiales y que se caracteriza por diferencias notables en la longitud de la grieta entre un extremo y otro 3 entre los extremos y el centro de la superficie fracturada. Esta diferencia de longitud que presenta la grieta a lo largo de la secci3n fisurada, trae como consecuencia que el ligamento resistente sea mayor en unas zonas que en otras, de modo que durante el posterior proceso de carga, y antes de que se desencadene la rotura final, tienen lugar peque1os crecimientos inestables de grieta que se caracterizan por cambios bruscos en la pendiente de las curvas Carga-COD, dando como resultado relaciones $P_{m\acute{a}x}/PQ$ elevadas (superiores a 1.1). Por lo tanto y a nuestro entender, el parámetro que mejor representaría el comportamiento a fractura de estos materiales sería el factor de intensidad de tensiones en el punto en el que se desencadenaría la rotura catastr3fica del material ($K_{m\acute{a}x}$).

Carril	Nº1	Nº2	Nº3
	$K_{m\acute{a}x}$ (MPa \sqrt{m})		
Cabeza	42.5	39.0	42.0
Alma (*)	---	---	36.2
Alma (**)	---	32.8	----

(*) probetas extraídas en direcci3n vertical y entalladas en direcci3n del espesor del carril

(**) probetas extraídas en direcci3n vertical y entalladas en direcci3n longitudinal (direc. laminaci3n)

Tabla 4. Valores de $K_{m\acute{a}x}$ en distintas zonas de los carriles

Los valores de tenacidad a fractura presentados por los tres carriles en la zona de cabeza son muy similares y las peque1as diferencias mostradas no parecen indicar que este parámetro dependa del grado de aleaci3n del carril. Sin embargo, si comparamos los resultados obtenidos entre cabeza y alma, sí se advierte un brusco descenso de la tenacidad en la zona del alma con respecto a la cabeza. Dicho descenso se deberá, en el caso del carril Nº3, a la diferente microestructura mostrada por el material en una zona y otra, mientras que en el carril Nº2 (en el que el descenso de tenacidad ha sido más fuerte) el efecto que sobre este parámetro ejerce la microestructura del material se verá reforzado por el hecho de que la direcci3n de propagaci3n de las grietas era distinta en un caso y en otro (en la zona de cabeza la propagaci3n se produce en direcci3n perpendicular a la de laminaci3n, mientras que en la zona del alma la direcci3n de propagaci3n de la grieta y la de laminaci3n coinciden)[5].

5. CONCLUSIONES

Se ha puesto de manifiesto como las propiedades mecánicas convencionales y la microestructura de los carriles de ferrocarril dependen de su composici3n

química y de las condiciones de fabricaci3n, y en este último supuesto más concretamente, de la velocidad de enfriamiento después de la laminaci3n en caliente. Asimismo la presencia de zonas segregadas en la zona central del alma del carril modifica su comportamiento mecánico.

Estos mismos fenómenos afectan tanto a la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga como a la tenacidad a la fractura de estos productos. En relaci3n a la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga se ha puesto de manifiesto que al aumentar la dureza del material, bien sea en virtud de un mayor grado de aleaci3n o como consecuencia de una velocidad de enfriamiento después de la laminaci3n más drástica, las grietas crecen por fatiga más rápidamente. Por otro lado, la tenacidad a la fractura de los carriles objeto de estudio apenas depende de su composici3n química (aceros perlíticos), habiéndose observado sin embargo que la presencia de fases no perlíticas ejercen una influencia notable en esta propiedad.

6. REFERENCIAS

[1] E.N., "Draft european rails standard: flat bottom symmetrical railways rails 46 kg/m and above", CEN/TC256/WG4/5/4 (Setiembre 1993).

[2] ORE, "Factors influencing the fracture resistance of rails in the unused condition", Report No.1, Office for Research and Experiments of the International Union of Railways, Utrech (1984).

[3] Orringer O., "Some suggestions for adjusting rail tests schedules to reflect track characteristics maintenanc, traffic, and weather", Rail Steels-Debvelopments, manufacturing and Performance, AIME Iron and Stelal Society, Warandale, PA (1993) 149-159.

[4] Jablonsky D., Tang Y.H. y Pelloux R.M., "Simulation of railroad crck growth life using laboratory specimens", Theo. and applied Fracture mechanics, 14 (1990) 27-36.

[5] Yasuo Ochi y McEvily A.J., "An evaluation of the fatigue crack growth and fracture thougness characteristics of rail steels", Engineering Fracture mechanics, Vol. 29, Nº2 (1988) 159-172.