

COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE PUENTES METALICOS ANTIGUOS DE FERROCARRIL

Por José M.^a Varona, Federico Gutiérrez-Solana y Javier J. González*

Resumen

Este artículo contiene un estudio del comportamiento en fatiga del material constituyente de puentes metálicos antiguos de ferrocarril, como paso previo para determinar la vida residual de los mismos.

Para ello fue necesario poner a punto una metodología de caracterización en fatiga de los materiales, acero y hierro pudelado, según los casos, obteniéndose las curvas de Wöhler tipo S-N correspondientes. Estas curvas se analizan en el ámbito de la normativa europea de cálculo estructural y recomendaciones de verificación en fatiga de construcciones metálicas.

Se destaca la relevante influencia de los defectos superficiales presentes en el material, lo que condiciona el procedimiento de obtención de probetas a partir de las muestras extraídas de los diferentes puentes, y se completa el trabajo con el análisis del comportamiento en fatiga de uniones soldadas.

1. INTRODUCCION

La Red Nacional de Ferrocarriles Españoles (RENFE) viene desarrollando en los últimos años estudios para la adecuación, tanto del material rodante como de sus instalaciones fijas, a las ma-

yores cargas y velocidad que la sociedad actual demanda. Entre ellos destaca la determinación de la vida residual de puentes metálicos antiguos en función de la historia de las cargas que han circulado hasta el presente y de las previsiones sobre la evaluación del tráfico en el futuro, a través de un mejor conocimiento del material de dichos puentes, de los esfuerzos que se transmiten entre las piezas y del comportamiento frente a las cargas exteriores que se repiten un gran número de veces, fatiga.

1.1. Extracción de muestras

Para proceder a la caracterización del material [1, 2], tanto desde el punto de vista convencional (análisis químico y metalográfico, soldabilidad y propiedades mecánicas) como en fatiga, se extrajeron por medios mecánicos muestras de material, procedentes de elementos resistentes perfectamente identificados (vigas, viguetas, largueros, diagonales, etc.), que fueron convenientemente restituidas.

Las muestras se obtuvieron de zonas de la estructura que habían estado débilmente solicitadas por la acción de las cargas para garantizar la validez de la caracterización en fatiga y, por motivos exclusivamente económicos asociados a su extracción, el número de ellas por puente fue muy reducido. Esto dio lugar a la realización de muy pocos ensayos de fatiga del material de cada puente y a la consiguiente dificultad del tratamiento estadístico de los mismos.

1.2. Normativa

El análisis estructural de los puentes requería, además del conocimiento del material desde el punto de vista resistente y a través de éste, la verificación de su capacidad portante, para permitir

En la actualidad RENFE está determinando la vida residual de puentes metálicos antiguos.

* Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Tierra, el Terreno y los Materiales.
División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad de Cantabria.
Avenida de Los Castros, s/n. 39005-SANTANDER. ESPAÑA.

**Los puentes
de las líneas
Madrid-Hendaya y
Madrid-Sevilla
son los que
están siendo
estudiados.**

con suficiente seguridad el paso de las circulaciones actuales y de las previstas en el futuro, y el estudio de su comportamiento en fatiga, al objeto de obtener la vida residual de los diversos elementos de la estructura y de sus medios de unión.

Las especificaciones [3-7] relativas al cálculo estructural y recomendaciones de verificación en fatiga de construcciones metálicas consideradas establecen unas curvas únicas para el acero, y en ocasiones para el hierro pudelado [7], en función de los detalles tipo de disposiciones constructivas (soldadas o robionadas) sin ninguna consideración respecto de las características mecánicas o del estado de deterioro que, con el paso del tiempo, puede presentar el material.

Estas consideraciones así como la falta de uniformidad de las especificaciones de unas y otras, con disparidades bastante acusadas en algunos casos, condujo a plantearse la obtención de las curvas de Wöhler reales del material constituyente en su estado actual, sobre las que se aplicarían las reducciones que contemplan las normas para los diferentes procedimientos constructivos que presentan los distintos elementos, o uniones entre éstos, de la estructura correspondiente.

1.3. Objetivos

En una primera fase, de acuerdo con lo anterior y disponiendo de material procedente de cuatro puentes metálicos de ferrocarril de la línea Madrid-Hendaya, se pretendió como objetivo la determinación de las curvas de Wöhler, tipo S-N, y de la velocidad de fisuración, $da/dN \cdot \Delta K_I$, mediante probetas tipo CT, realizando posteriormente un análisis fractográfico complementario que permitiera asociar la dispersión observada en los resultados con la variabilidad de los defectos presentes en el material analizado, en los cuales se nuclea e inicia la fisura de fatiga [8].

Como segunda fase y con muestras del material procedente de cinco puentes metálicos de la línea Madrid-Sevilla, con caracterización química, microestructural y mecánica conocida, que sólo permitían su ensayo a fatiga y se recibieron debidamente referenciadas, se trató de reforzar el análisis de la influencia de dichos defectos en dos niveles de concreción: el primero, estableciendo la variabilidad de la caracterización en función del modo de preparación de las muestras y, el se-



Foto 1. Detalle de escorias en hierro pudelado.

gundo, intentando correlacionar la variabilidad de respuestas en fatiga con cambios de variables intrínsecas del material, tanto metalúrgicas —microestructura, nivel inclusionario o de precipitación— como relacionadas con su comportamiento mecánico —límite elástico o tensión de rotura [9].

Por último, como tercera fase y con un subconjunto de estas últimas muestras, se tomó como objetivo la determinación del comportamiento a fatiga del material soldado [10], junto con la morfología de la superficie de rotura mediante el correspondiente análisis fractográfico, tratando de justificar la importante reducción que establecen las normas para uniones soldadas según los diferentes detalles tipo.

2. PRUEBAS DE LABORATORIO

De las muestras proporcionadas de material de los puentes de la línea Madrid-Hendaya se obtuvieron, mediante corte y mecanizado, las porciones necesarias para la realización de las probetas planas, utilizadas en el ensayo clásico habitual de fatiga con diferentes niveles de amplitud de carga, y de las probetas CT, y de aquellas necesarias para la caracterización mecánica convencional (tracción, resiliencia, doblado y soldabilidad), e incluso un cupón para análisis químico y metalográfico.

Del material de los puentes de la línea Madrid-Sevilla se recibieron únicamente las muestras ya cortadas para el ensayo de fatiga clásico, unas conservando el borde libre longitudinal de la plétna original (corte exterior) y otras presentando dos cortes paralelos a dicho borde (corte interior). En ambos casos, el sentido longitudinal de la probeta coincide con la dirección de los esfuerzos que solicitaban la muestra, según su localización sobre la estructura, para reproducir las condiciones tensionales teniendo en cuenta la segura falta de isotropía de estos productos de laminación.

A continuación se destacan las características más sobresalientes de los materiales ensayados y la metodología experimental desarrollada.

2.1. Materiales

El acero de los cuatro puentes de la línea Madrid-Hendaya presentó, en todos los casos, una microestructura ferrítico-perlítica acorde con su contenido en carbono y el hierro pudelado, de matriz ferrítica; tiene como principal característica microestructural la presencia de escorias (Foto 1), orientadas en la dirección de laminación y de gran tamaño, superando en ocasiones el milímetro de longitud. La Tabla 1 recoge la composición química y el límite elástico de las muestras con contenido en carbono máximo y mínimo.

Como parcialmente puede apreciarse en dicha tabla, dado que en ella no aparece la relación de todas las muestras proporcionadas, la mayoría de ellas presentaban altos contenidos en azufre y fósforo, superiores a los que permite la norma UNE 36-080-85 para los aceros estructurales, estando sus límites elásticos comprendidos entre

Tabla 1. Características de los materiales (Línea Madrid-Hendaya)

Puente	Material	Muestra	Composición química					Límite elástico σ_y (MPa)
			C	Mn	Si	P	S	
1	Acero	6	0,133	0,64	0,12	0,064	0,051	293,3
		3	0,027	0,40	< 0,03	0,035	0,029	197,7
2	Hierro	7	0,010	0,03	0,10	0,410	0,026	240,8
	pudelado	1	0,001	0,04	0,13	0,480	0,037	261,4
3	Acero	4	0,088	0,42	< 0,03	0,050	0,052	250,6
		3	0,053	0,37	< 0,03	0,041	0,058	300,7
4	Hierro	8	0,008	< 0,02	0,38	0,550	0,053	266,3
	pudelado	5	0,001	< 0,02	0,39	0,600	0,067	254,1
4	Acero	2	0,206	0,52	< 0,03	0,030	0,071	304,1
		6	0,036	0,46	< 0,03	0,007	0,0027	300,2

200 y 350 MPa para los aceros y entre 240 y 350 MPa para los hierros pudelados.

El material de todas las muestras extraídas de los cinco puentes de la línea Madrid-Sevilla fue siempre acero de naturaleza ferrítico-perlítica, con un límite elástico variable entre 250 y 360 MPa e iguales consideraciones que los anteriores en cuanto a los contenidos de azufre y fósforo, que podría clasificarse conjuntamente, según la referida norma española, como acero A 310-0, sin limitaciones en cuanto a composición química.

2.2. Metodología experimental

Para la obtención de la caracterización en fatiga se siguieron dos procedimientos paralelos y complementarios: el primero, utilizando los principios de Mecánica de la Fractura y empleando probetas tipo CT, permitió obtener las curvas de velocidad de propagación de fisuras, $da/dN \cdot \Delta K_I$, para los dos materiales constituyentes, las cuales se representan en la Fig. 1, y el segundo, a través de probetas planas ensayadas a fatiga con diferentes niveles de amplitud de carga y aplicando el resultado anterior, condujo finalmente a conseguir las curvas de Whöler correspondientes.

Las muestras suministradas de los puentes de la línea Madrid-Sevilla no permitieron disponer de probetas CT y, consecuentemente, se utilizaron para las curvas S-N, $N = C (\Delta\sigma)^{-k}$, los valores de k sugeridos por las diferentes normas, y en particular, sus valores extremos: 3 (CECM) y 5 (UIC).

2.2.1. Preparación de probetas

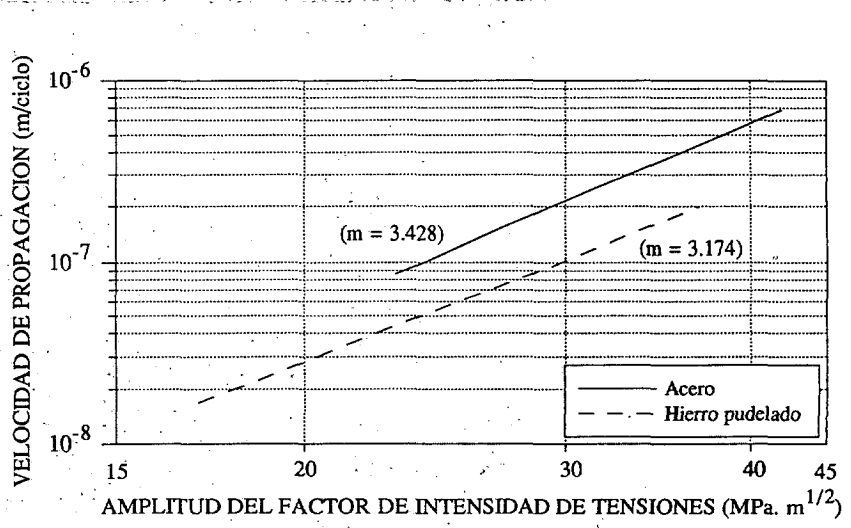
Las probetas tipo CT se realizaron con un espesor igual al de la pieza extraída y disponiendo el plano de entalla perpendicular a su dirección de trabajo sobre la estructura (dirección de lamina-

ción). Dicho espesor permite definir unívocamente la geometría de las mismas.

Las probetas longitudinales planas, tanto de corte exterior como de corte interior, se consiguieron por corte mecánico de las muestras facilitadas, conservando su estado original y repasando convenientemente las líneas de corte para lograr que el proceso de iniciación de fisuras se localizara en defectos presentes en el material en su estado actual. El sistema de anclaje probeta-máquina de ensayo adoptado consistió en un encasquillado de los extremos con tubo de acero calibrado e interposición de un mortero 1:1 de resina epoxi [11].

Las probetas soldadas se obtuvieron partiendo de muestras de corte interior, cortándose trans-

Fig. 1. Velocidad de propagación en fatiga de los materiales ensayados.



versalmente y preparándose los bordes en chaflán a 30°. Se soldaron normalmente las dos partes en electrodo de 3,25 mm de diámetro del tipo OK 4800 (UNE E 455 B20), resanando la cara inversa por amolado y completando finalmente la soldadura de esta zona con el mismo electrodo [2].

2.2.2. Ensayos

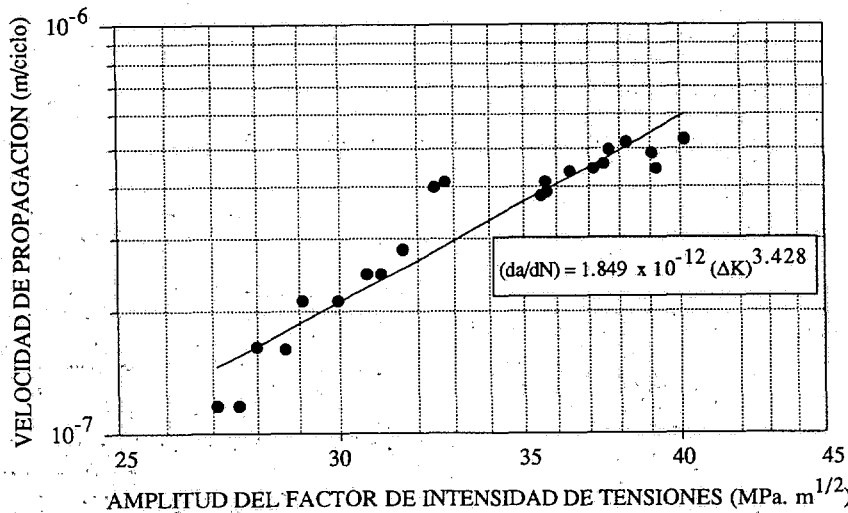
Las probetas tipo CT (Compact Test) disponen de una entalla central en cuyo fondo se inicia el proceso de fisuración por fatiga del material, controlándose la velocidad de propagación con ayuda de un extensómetro dinámico que permite establecer el valor de la función «flexibilidad», directamente relacionada con la profundidad de fisura:

$$\text{Flex} = \frac{\text{COD}_{\max} - \text{COD}_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (1)$$

donde COD es la medida del desplazamiento la línea de carga dado por el extensómetro. La relación flexibilidad-longitud de fisura se establece mediante la correlación obtenida entre ambas variables en diferentes paradas, midiéndose la última de ellas con la ayuda de un proyector de perfiles. Una vez obtenida esta correlación, todas las medidas de la flexibilidad, obtenidas secuencialmente para controlar el proceso, son medidas indirectas de la longitud de fisura, las cuales permiten determinar la velocidad de propagación.

El otro factor que gobierna el proceso de fisuración por fatiga en zona II, conocida como ley de Paris, es la amplitud de oscilación del factor de in-

Fig. 2. Ley de propagación tipo Paris para el acero.



tensidad de tensiones ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$). Dicha oscilación se calcula a partir de la expresión:

$$\Delta K = f\left(\frac{a}{W}\right) \frac{\Delta P \cdot \sqrt{a}}{B \cdot W} \quad (2)$$

donde Δp es la variación de la carga aplicada y $f(a/W)$ es una función polinómica adimensional del cociente a/W , siendo W la anchura de la probeta. Esta función está tabulada para diferentes geometrías y, en concreto, para la aquí utilizada.

Todo ello permite finalmente encontrar, para distintos valores de la amplitud del factor de intensidad de tensiones, el correspondiente valor de la velocidad de crecimiento de la fisura. Tras una selección de estos puntos, que evite la discontinuidad que ofrece la falta de homogeneidad del material a escala microscópica, se halla la curva de regresión del tipo $da/dN = C (\Delta K)^m$ buscada. La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos para el acero estudiado.

En cuanto a los ensayos sobre probetas planas, las Tablas 2 y 3 recogen los datos relativos a la sección de las mismas, los parámetros del ensayo y, como resultados, el número de ciclos soportados por cada probeta. Estas se obtuvieron de las muestras o piezas suministradas de los puentes n.º 1 y n.º 2, de acero y hierro pudelado, respectivamente. De forma análoga se trabajó con los materiales de los otros puentes.

En aquellas probetas, p.e. 4, 5, 7 y 8 de la Tabla 2, que alcanzaron 2×10^6 ciclos en fatiga sin romper para un determinado valor de $\Delta\sigma$, éste fue incrementado en una segunda parte del ensayo hasta conseguir la rotura, estableciéndose el número de ciclos a rotura en esta fase.

En la Fig. 3, a título informativo, están representados los resultados obtenidos correspondientes a la Tabla 2, en papel doblemente logarítmico, observándose su situación relativa respecto de las especificaciones de cálculo estructural y recomendaciones de verificación en fatiga de construcciones metálicas. Se observa también que el punto 4', relativo a la segunda parte del ensayo de la probeta de la pieza 4, parece estar fuera de rango que tienen el conjunto de todos ellos. Ello se debió a que, como se comprobó por microscopía electrónica [8], el nivel de tensiones que soportó durante los primeros dos millones de ciclos fue superior al límite de fatiga, comenzando a fisurar pero sin llegar a alcanzarse la situación crítica, y el defecto consiguiente de partida no era ya el original.

2.2.3. Caracterización en fatiga

Los ensayos de fisuración sobre las probetas CT sirvieron para obtener la pendiente m de la ley de Paris, $da/dN = C (\Delta K)^m$, que, como puede comprobarse, se corresponde, en primera aproximación, con el exponente k de las curvas S-N de resistencia a fatiga que utilizan las diferentes normativas, $N = C' (\Delta\sigma)^{-k}$, para tensiones normales.

Tabla 2. Ensayos y fatiga. Puente n.º 1 (acero)

Muestra	Dimensiones (mm)	Límite elástico σ_y (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)		ΔP (kN)		Ciclos	
			1.ª parte	2.ª parte	1.ª parte	2.ª parte	1.ª parte	2.ª parte
1	9,7 x 27,8	201,0	176,6	—	47,7	—	1365679	—
2	10,0 x 27,0	294,3	255,1	—	68,9	—	206260	—
3	11,3 x 25,3	196,2	157,0	—	44,9	—	672168	—
4	11,5 x 15,0	201,1	137,4	186,4	39,5	53,6	2000000	72759
5	10,7 x 25,0	294,3	255,1	274,7	68,2	73,5	2000000	1543196
6	10,7 x 26,3	294,3	235,5	—	66,3	—	1683054	—
7	12,3 x 26,5	294,3	215,8	264,9	70,3	86,3	2000000	463196
8	12,0 x 25,0	294,3	196,2	255,1	58,9	76,5	2000000	—
							463188	721757

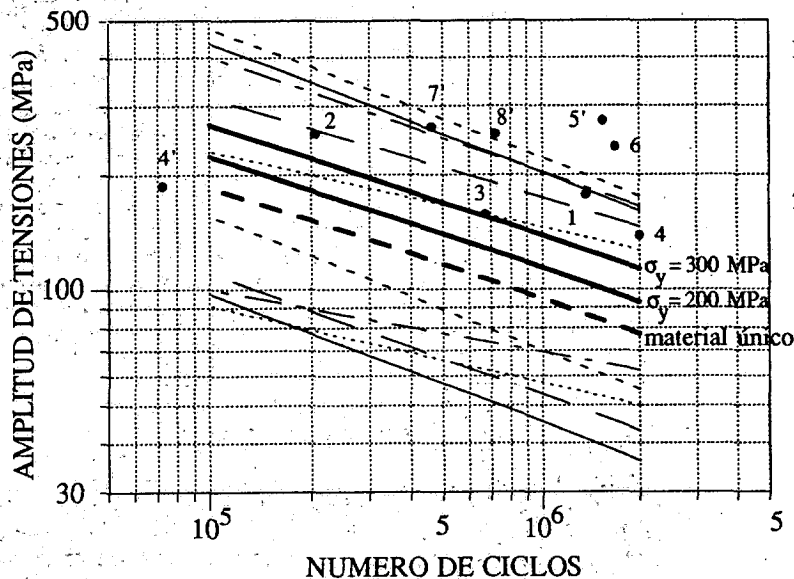
Tabla 3. Ensayos de fatiga. Puente n.º 2 (hierro pudelado)

Muestra	Dimensiones (mm)	Límite elástico σ_y (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)		ΔP (kN)		Ciclos	
			1.ª parte	2.ª parte	1.ª parte	2.ª parte	1.ª parte	2.ª parte
1	12,0 x 28,2	260,0	215,8	—	73,0	—	25971	—
2	12,0 x 24,0	240,3	176,6	206,0	50,9	59,3	2000000	618457
4	9,5 x 23,5	245,3	215,8	—	48,2	—	156449	—
6	10,0 x 24,5	240,3	196,2	—	48,1	—	263781	—
7	10,0 x 24,0	240,3	196,2	—	47,1	—	399038	—
8	10,5 x 22,3	235,4	176,6	—	41,3	—	71957	—
9	10,0 x 21,5	264,9	196,2	225,6	42,2	48,5	2000000	742417
11	10,5 x 22,0	279,6	235,4	—	54,4	—	435222	—

Los valores obtenidos, 3,428 para los aceros estructurales y 3,174 para los hierros pudelados, concuerdan con los sugeridos por las diferentes normas que varían de 3 a 5 y con experimentaciones anteriores, sobre aceros estructurales de

microestructura ferrítica-perlítica [12], variables de 3 a 4,2.

Posteriormente, utilizando dichos valores obtenidos para k y mediante un tratamiento estadístico, ha sido posible establecer la curva S-N carac-



Notas :

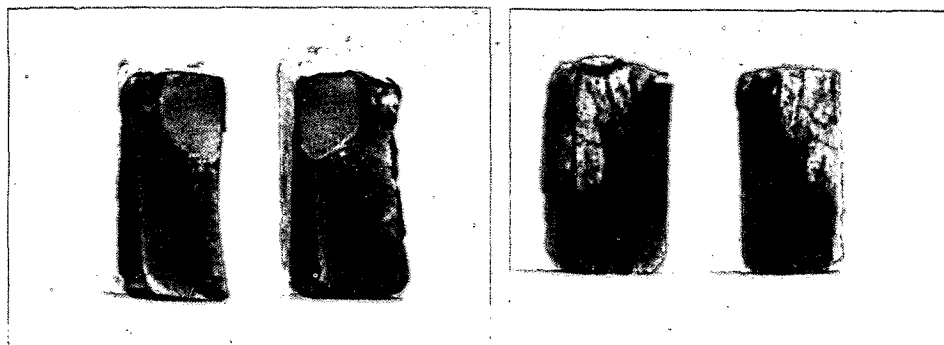
4, 5, 7 y 8 - 2×10^6 ciclos

1, 3 y 4 $\sigma_y = 200$ MPa

2, 5, 6, 7 y 8 $\sigma_y = 300$ MPa

—	CECM
- - -	SIA
- · - ·	IPA
— · —	BSI
· · · · ·	UIC

Fig. 3. Ensayos de fatiga y curvas S-N. Puente n.º 1.



De izquierda a derecha:
Foto 2. Macrografía de una rotura en acero. Foto 3. Macrografía de una rotura en hierro pudelado. Foto 4. Defecto inicial en acero.

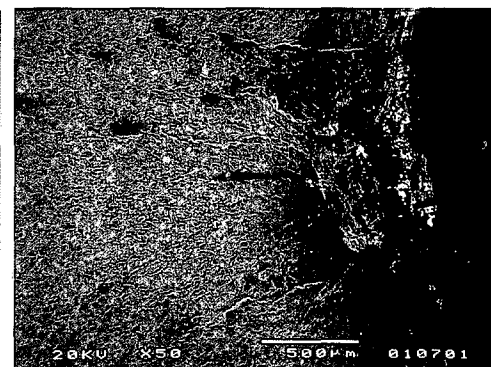
terística a utilizar para cada puente objeto de estudio. Dicho tratamiento estadístico consistió en obtener, para cada uno de los ensayos y de acuerdo con el valor de k , la fluctuación de tensiones para la cual la probeta soportaría 2×10^6 ciclos y determinar posteriormente con todos ellos un valor de cálculo, $\Delta\sigma_c$, igual al valor medio menos dos veces la desviación típica, lo que proporciona, suponiendo una distribución normal, un nivel de confianza del 97,5 %.

De esta forma, queda definida la curva S-N correspondiente sin más que hacer pasar por el punto (2×10^6 , $\Delta\sigma_c$) una recta de pendiente $-1/k$ en representación doblemente logarítmica. Esta curva, para las dos clases de acero presentes en el puente n.º 1, y la correspondiente a considerar todas las muestras como de un único material están también representadas en la Fig. 3.

2.2.4 Fractografía

Se realizaron macrografías de la sección de rotura de todas las probetas ensayadas (Fotos 2 y 3) y micrografías por microscopía electrónica de las zonas de propagación en fatiga y rotura final, tratando de identificar su morfología, así como del defecto inicial que originó la fisura (Foto 4).

Especial consideración debe hacerse al estudio fractográfico realizado sobre la rotura de las probetas soldadas (Fotos 5 y 6), demostrando que las fisuras de fatiga se iniciaron, en todos los casos, a partir de las escorias producidas en el proceso de soldadura [10].



3. RESULTADOS

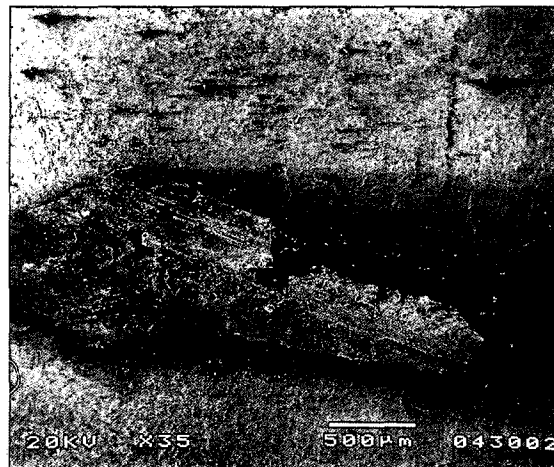
3.1. Primera fase

Partiendo de las tablas que recogen los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga sobre probetas planas con borde libre (corte exterior) y siguiendo el proceso expuesto en 2.2.3, se determinaron las curvas S-N correspondientes al material constituyente de cada puente de esta primera fase [8]. La Fig. 3 constituye un ejemplo de las curvas de Wöhler que se obtuvieron y que definen, en las condiciones actuales del material y con un muy alto nivel de confianza, el comportamiento en fatiga de los dos tipos de aceros presentes en el puente n.º 1, y la Tabla 4 resume, para todos los puentes analizados, los valores de corte $\Delta\sigma_c$ obtenidos a partir de los cuales pueden deducirse sus respectivas curvas S-N.

3.2. Segunda fase

Con cada uno de los dos grupos de probetas, de corte exterior y de corte interior, utilizando los valores extremos de k ($k = 3$ para CECM y $k = 5$ para la UIC) y considerando un único material para los cinco puentes de esta fase, dado que todas las muestras presentaban características y comportamiento similares, se realizó el mismo proceso anterior con los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga [9].

Las Tablas 5 y 6 resumen los valores estadísticos obtenidos, y en la Fig. 4 se representan las



De izquierda a derecha:
Foto 5. Macrografía de una rotura en probeta soldada. Foto 6. Micrografía de escoria de iniciación de la fisuración.

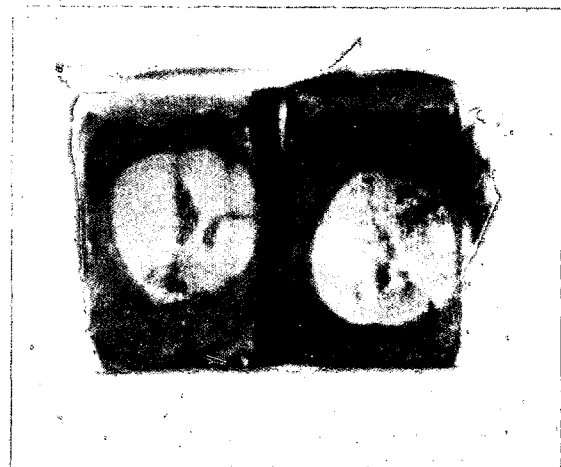


Tabla 4. Caracterización en fatiga (Línea Madrid-Hendaya)

Puente	Material	σ_y (MPa)	$\Delta\sigma_c$ (MPa)
		300	112,5
1	Acero	200	92,7
		Global (200-300)	77,2
2	Hierro pudelado	Global (240-280)	28,3
3	Acero	Global (250-300)	60,4
	Hierro pudelado	Global (250-350)	24,5
4	Acero	Global (260-350)	100,9

Tabla 5. Resultados estadísticos (MPa) de las probetas de corte exterior

Valores estadísticos	CECM (k = 3)	UIC (k = 5)
$\Delta\sigma_2 \times 10^6$	162,6	190,5
Desviación típica(s)	31,2	21,4
$\Delta\sigma_c$	100,2	147,7

Tabla 6. Resultados estadísticos (MPa) de las probetas de corte interior

Valores estadísticos	CECM (k = 3)	UIC (k = 5)
$\Delta\sigma_2 \times 10^6$	114,5	160,8
Desviación típica(s)	25,2	19,0
$\Delta\sigma_c$	64,1	122,8

Tabla 7. Resultados estadísticos (MPa) de las probetas soldadas

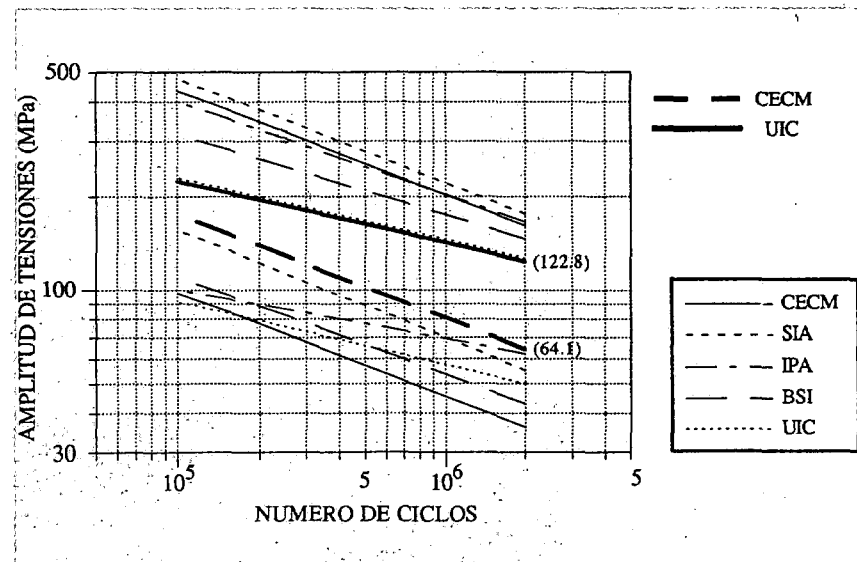
Valores estadísticos	CECM (k = 3)	UIC (k = 5)
$\Delta\sigma_2 \times 10^6$	211,8	236,4
Desviación típica(s)	38,5	25,3
$\Delta\sigma_c$	134,8	185,8

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Primera fase

Se observó, como se aprecia en la Fig. 3, una buena correlación de $\Delta\sigma_c$ con σ_y para los aceros de los Puentes 1 y 4 (el acero de mayor límite elástico presenta un mayor valor de corte), que

Fig. 4. Curvas S-N de caracterización obtenidas para k = 5 (UIC).



curvas de caracterización correspondientes a utilizar la pendiente UIC, la cual se ajusta mejor a los resultados experimentales.

3.3. Tercera fase

Utilizando la misma metodología [10], las muestras soldadas proporcionaron los resultados que se relacionan en la Tabla 7 junto con el estudio estadístico de los mismos.

En la Fig. 5 se representan los resultados obtenidos y las curvas S-N establecidas a partir de su análisis global en relación, como siempre, con las especificaciones de cálculo estructural y recomendaciones de verificación en fatiga de construcciones metálicas consideradas.

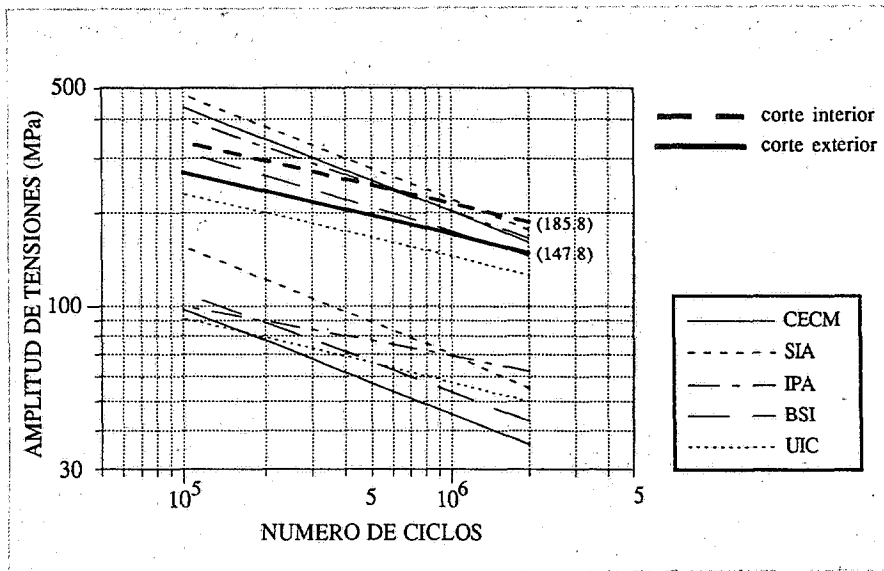


Fig. 5. Curvas S-N de caracterización en fatiga (material soldado).

no se cumple para el acero del Puente 3 posiblemente porque de este último se dispuso de un menor número de muestras que presentaron unos defectos más dispares. Esta correlación no pudo establecerse para el hierro pudelado presente en los Puentes 2 y 3, dado que su límite elástico fluctúa en ambos casos entre 250 y 300 MPa, salvo el caso excepcional de la pieza 6 del Puente 3 con un límite elástico del orden de los 350 MPa [8].

Puesto que las normativas no hacen consideración alguna a las características mecánicas o al estado de defectos del material y al objeto de aumentar el tamaño de la muestra, se obtuvieron los resultados conjuntos que se recogen en la Tabla 8.

En ella se puede apreciar que, en cuanto a prestaciones mecánicas convencionales, ambos materiales presentan características de uniformidad equivalente que, incluso, establecen valores de diseño muy próximos para ambos, en torno a 200 MPa. Sin embargo, en fatiga, la respuesta de los aceros estructurales es muy diferente a la de los hierros pudelados, tanto en valores absolutos, los aceros son más resistentes, como en la uniformidad de respuesta, resultando que las relaciones S-N aplicables al diseño con igual nivel de confianza sea muy inferiores para el hierro pudelado, 24,1 MPa frente a 73,8 MPa en valores de $\Delta\sigma_c$.

4.2. Segunda fase

Las diferentes curvas S-N obtenidas según el procedimiento de preparación de probetas, con un $\Delta\sigma_2 \times 10^6$ del orden del 35 % (CECM) o 25 %

(UIC) superior para las muestras de corte interior, justificó la realización de un análisis complementario de los resultados obtenidos, tratando de relacionar los valores de corte, $\Delta\sigma_2 \times 10^6$, de cada probeta con diferentes variables metalúrgicas propias del material y con variables de comportamiento mecánico. En todos los casos se observó una falta de influencia de las variables analizadas con el comportamiento en fatiga [9], mostrándose en la Fig. 6, a modo de ejemplo, su relación con el contenido de azufre como índice del estado inclusionario.

Tampoco se encontró relación alguna con el porcentaje de carbono, como índice de proporción de ferrita y perlita en la microestructura, ni con el de fósforo, que dominaría el efecto relativo a la precipitación en borde de grano, ni tampoco con variables de comportamiento mecánico como el límite elástico y la tensión de rotura, lo que refuerza la influencia en el comportamiento en fatiga del estado superficial de defectos presentes en el material, como quedó patente tras el análisis fractográfico realizado.

4.3. Tercera fase

El análisis de los resultados obtenidos y su comparación con el realizado para el material base [9] pone de manifiesto la importante reducción en la resistencia a fatiga de las uniones soldadas con referencia a aquél. Los valores obtenidos de cálculo, $\Delta\sigma_c$, de 64,1 y 122,7 MPa, según CECM y UIC, representan el 48 % y el 66 % de los determinados para el grupo de probetas de corte interior del cual se tomaron, respectivamente [10].

Estas reducciones están en consonancia con las que establecen las normativas y, más concretamente, la de UIC (coeficiente de reducción de 0,65 para el detalle de soldadura tipo III, o 0,50 para tipo IV, sobre los 126 MPa que especifica para el material base) proporcionando una mejor correlación de resultados con la pendiente utilizada ($k = 5$). Una regresión de éstos daría una pendiente que aún propiciaría un valor de k mayor.

5. CONCLUSIONES

El análisis de la fiabilidad estructural de estos puentes antiguos ante problemas de fatiga debe sustentarse en un análisis previo del comportamiento en fatiga de sus materiales dado que, aunque los valores medios obtenidos (156,8 y 88,3 MPa para aceros y hierros pudelados respectivamente) son del orden de los especificados en la normativa utilizada, la dispersión de los resultados, asociada a la variabilidad de defectos pre-

Tabla 8. Estudio estadístico global (Línea Madrid-Hendaya)

Material	σ_y	s	$\sigma_y - 2 \cdot s$	$\Delta\sigma_2 \times 10^6$	$\Delta\sigma_c$
Acero	270,8	34,9	201,0	156,8	73,8
Hierro pudelado	263,2	30,3	202,5	88,3	24,1

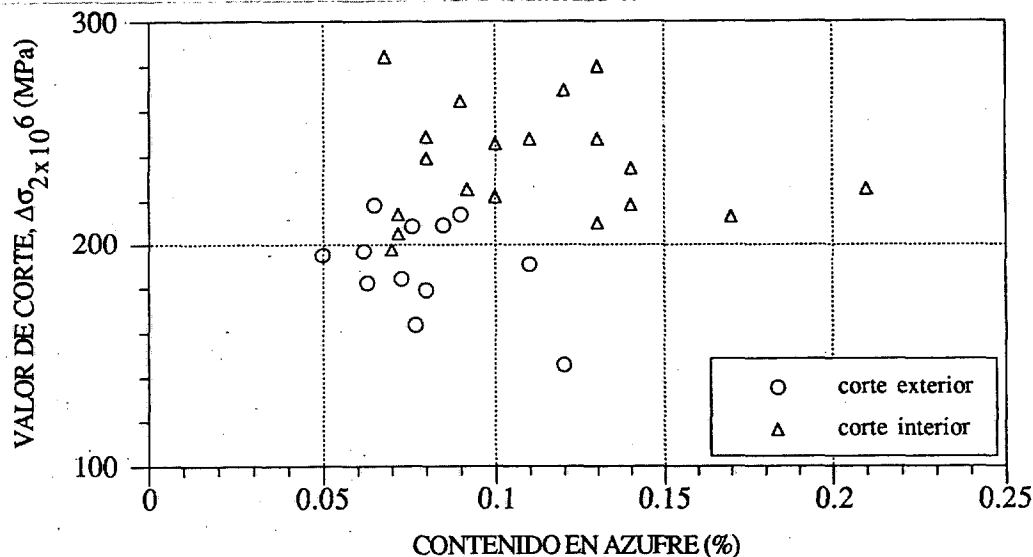


Fig. 6. Relación entre $\Delta\sigma_2 \times 10^6$ y el contenido de azufre.

sententes en el material, condiciona los valores de cálculo a utilizar en base a conseguir un alto nivel de confianza.

Para la caracterización en fatiga de materiales de estructuras en uso, la preservación de los defectos superficiales es fundamental para que las probetas a utilizar mantengan la representatividad adecuada. Esto debería hacerse extensivo a todo estudio del comportamiento en fatiga de cualquier tipo de material y, en este sentido, la normativa correspondiente debería definir de manera precisa la forma de toma de muestras y preparación de probetas para conseguirlo.

La aplicación de las técnicas de soldadura usuales en la construcción de elementos estructurales producen escorias de gran tamaño donde se inicia la fisuración por fatiga, reduciendo la resistencia de las uniones soldadas. Los valores obtenidos de esta reducción son acordes, en general, con los establecidos por las normas, que catalogan las uniones soldadas por tipologías definidas.

Tanto para el material base como para el material soldado, los resultados obtenidos se adecuaron mejor a los especificado por la normativa UIC, que aporta menor dispersión y un valor de k más acorde con la pendiente de regresión de los puntos S-N de los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló, en su primera fase, en el marco de un Convenio de Investigación suscrito con Tecnología e Investigación Ferroviaria, S. A. (TIFSA), agradeciéndoles la confianza depositada en nuestra División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

REFERENCIAS

1. Varona, J. M., Gutiérrez-Solana, F. y González, J. J. Caracterización convencional y en fatiga de material de puentes metálicos de ferrocarril. Estudio de cuatro puentes de la Línea Madrid-Hendaya.

2. Varona, J. M., Gutiérrez Solana, F. y González, J. J. Caracterización convencional y en fatiga de material de puentes metálicos de ferrocarril. Estudio de cinco puentes de la Línea Madrid-Sevilla. Santander 1989, Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Tierra, el Terreno y los Materiales, Universidad de Cantabria, Informes. 110, 129, 115 y 142 p.
3. Recommandations pour la vérification à la fatigue des structures en acier. Recommandations de la Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM), 1985. 33 p.
4. SN 555 161. Constructions métalliques. Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA), 1979. 108 p.
5. Propuesta sobre la comprobación a Fatiga. Instrucción Puentes de Acero (IPA), 1982. 20 p.
6. BS 5400. Steel, concrete and composite bridges (Part 10). British Standards Institution (BSI), 1980. 56 p.
7. UIC 779-1 R. Recommandations pour la détermination de la capacité portante des structures métalliques existantes. Union International des Chemins de fer (UIC), 1986. 57 p.
8. Varona, J. M., Hernández, A., Gorrochategui, I., Gutiérrez-Solana, F. y González, J. J. Caracterización en fatiga de material de puentes metálicos antiguos de ferrocarril. Anales de Mecánica de la Fractura 6 (1989), p. 231-238.
9. Varona, J. M., Gutiérrez-Solana, F., Alvarez, J. A. y González, J. J. Comportamiento en fatiga de acero estructural de antiguos puentes de ferrocarril. Anales de Mecánica de la Fractura 7 (1990), p. 63-70.
10. Varona, J. M., Gutiérrez-Solana, F., González, J. J., Sánchez, L. y Alvarez, J. A. Comportamiento en fatiga de uniones soldadas y su influencia en la resistencia a fatiga de puentes metálicos. Anales de Mecánica de la Fractura 8 (1991), p. 77-83.
11. Varona, J. M., Gutiérrez-Solana, F., González, J. J. Optimización del sistema de anclaje para ensayos de fatiga de armaduras activas pretensadas (alambres y cordones). Hormigón y Acero 172 (1989), p. 99-104.
12. Rolfe, S. T. y Barsom, J. M. Fracture and fatigue control structures. Applications of Fracture Mechanics. Englewood Cliffs 1977, Prentice-Hall. 562 p.