

**APLICACION DE LA MECANICA DE LA FRACTURA EN EL ENSAYO A FATIGA DE UNA ESTRUCTURA DE CAJA FERROVIARIA CONSTRUIDA EN ALEACIONES LIGERAS**

Giménez J.G.<sup>+</sup>, Gutiérrez Y.<sup>+</sup>, Figuerido L.A.<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S.A., BEASAIN

<sup>\*</sup> Centro de Investigaciones y Estudios Técnicos de Guipuzcoa, Ibaeta, 20009 - SAN SEBASTIAN

Resumen.- Se presenta una metodología para el ensayo a fatiga resonante de una estructura de coche ferroviario. La determinación de las sollicitaciones de ensayo y su duración se basa en la aplicación de la ecuación de Paris y de técnicas "rainflow" de recuento de ciclos. El rango de sollicitaciones umbral de propagación de grieta resulta dependiente de su tamaño inicial. Se incluye una discusión sobre las limitaciones del ensayo, que en general resultará más severo que el servicio real. Se incluye también una descripción de la instrumentación utilizada, de las condiciones de ensayo y de los resultados obtenidos en el mismo.

Abstract.- This paper presents a method for fatigue testing of body structures of railway coaches. Paris equation and rainflow counting techniques have been applied in order to determine both, test load range and number of cycles. The load threshold for crack growing results dependent of the assumed initial crack size. A discussion about the test limitations is included, being usually the test more severe than the real operation. Test conditions, instrumentation, and results are also described below.

## 1. INTRODUCCION

Las cajas ferroviarias y los equipos instalados en ellas descansan sobre dos etapas de suspensión que reducen de forma muy notable el nivel de sollicitaciones dinámicas aplicado a las mismas. Como consecuencia de ello y del sobredimensionamiento tradicional de las estructuras de caja ante cargas dinámicas, derivada de la necesidad de soportar otros tipos de sollicitaciones, no fué necesario en el pasado fijar criterios ni realizar ensayos de fatiga de las mismas.

Sin embargo, la necesidad de aligeramiento de los vehículos, como medio de reducción de costos de energía de explotación en trenes de cercanías, o para reducir las cargas sobre la vía en los vehículos de alta velocidad, ha requerido el desarrollo de diseños estructurales de caja en los que las tensiones de trabajo de sus miembros estructurales quedan próximas a sus valores límite, y en los que la utilización de nuevos materiales es cada vez más frecuente.

A pesar de que en estos diseños se están utilizando métodos de cálculo avanzado [1] que permiten un mejor conocimiento de las tensiones de trabajo del material, la utilización de materiales más sensibles a la propagación de grietas por fatiga (aleaciones ligeras frente a aceros al carbono utilizados tradicionalmente) y el aumento general del nivel de tensiones de trabajo asociado a un mejor aprovechamiento del material, hacen que los riesgos asociados a un defecto de proyecto, fabricación o del material sean mucho mayores. Como consecuencia, si bien hasta ahora no se había considerado necesaria la realización de ensayos de fatiga en las cajas, en la actualidad, cuando se emplean en su fabricación aleaciones ligeras, resulta aconsejable su realización, al menos en un prototipo de la serie.

## 2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

El ensayo a fatiga de una estructura de caja ferroviaria presenta problemas de diferentes tipos que han limitado de

forma importante su realización:

- El peso y tamaño de las estructuras exigen instalaciones de gran capacidad, muy poco frecuentes y de elevado coste de utilización.

- El rango de frecuencia de las solicitudes dinámicas alcanza las primeras frecuencias naturales estructurales, por lo que las cargas aplicadas deben coincidir con las reales, no sólo en magnitud sino también en frecuencia.

- La mayoría de las veces no se dispone de datos suficientes sobre las solicitudes reales que se producen en servicio, y tampoco es posible obtenerlos.

Existe muy poca experiencia en la realización de esta clase de ensayos.

Hasta la fecha los autores tienen conocimiento de la realización de dos tipos de ensayo a fatiga de cajas, aunque no han dispuesto de la metodología que ha permitido su realización:

- Ensayo a fatiga resonante [2] en el que se sintoniza el primer modo de flexión vertical de la caja, controlando su amplitud de vibración en base a la tensión producida en un punto considerado "a priori" como crítico.

- Ensayo en el que se excita dinámicamente la estructura presumiblemente a frecuencias inferiores a las de resonancia estructural. La sociedad A.I.B. ha ensayado de esta forma [3] varias estructuras de caja.

La ventaja del primer método consiste fundamentalmente en la sencillez de la instalación necesaria. Sus limitaciones provienen, por el contrario, de la utilización de un único modo de vibración, el cual no es totalmente representativo de la distribución de tensiones que sufren en servicio cada uno de los puntos de la estructura.

El segundo tipo de ensayo requiere una instalación algo más potente, pero si se realiza a baja frecuencia, tampoco se garantiza una correlación total entre la distribución de tensiones en ensayo y en servicio. Por otra parte, la aplicación exclusiva de solicitudes verticales reduce adicionalmente la representatividad del ensayo.

En el establecimiento de la metodología a seguir para el ensayo de una caja de coche ferroviario se han tenido en cuenta las limitaciones de los métodos utilizados previamente. En el caso que nos ocupa ha sido necesario considerar una limitación adicional: no existe ninguna estructura similar en servicio, por lo que no ha sido posible medir tensiones en condiciones reales de explotación.

La utilización de la teoría de propagación de grietas, derivada de la Mecánica Lineal de la Fractura, se adapta de forma adecuada al estudio de fatiga de estas estructuras. Por el tipo de construcción y por su tamaño, no puede excluirse la posible existencia inicial de defectos asimilables a grietas en diversas zonas de la estructura, por lo que su vida a fatiga estará dominada fundamentalmente por la fase de propagación más que por la de iniciación de grietas.

Para aplicar la Teoría de Propagación de Grietas debe considerarse que en estas estructuras habitualmente no se aplica ningún tipo de tratamiento de reducción de tensiones residuales inducidas por soldadura, por lo que en su etapa inicial la propagación se producirá en un campo de tensiones medias de tracción muy elevadas, próximas al límite elástico [4].

### 3. METODO DE DETERMINACION DE LAS SOLICITACIONES DE ENSAYO

A la hora de definir las condiciones del ensayo la dificultad principal se encontraba en la definición de criterios relativos al establecimiento de las solicitudes a aplicar, tanto en lo referente al tipo de dichas solicitudes como a su magnitud y duración.

La cuestión relativa al tipo de solicitudes que se aplicarían se resolvió estructurando el ensayo en dos fases:

- Fase 1: solicitud bajo carga vertical.
- Fase 2: solicitud bajo cargas vertical, lateral y de torsión.

La magnitud y duración de las solicitudes a aplicar debían cumplir fundamentalmente el requisito de ser representativas de las solicitudes de servicio. Su establecimiento debía basarse por tanto en datos experimentales, por lo que la metodología a seguir debería tener en cuenta, además de la base teórica aplicable, el tipo de datos de los que se podría disponer.

Teniendo en cuenta estas reflexiones, se desarrolló la metodología que se expone a continuación y que se particularizó para cada tipo de solicitud a aplicar.

El criterio seguido para el establecimiento de las solicitudes de ensayo fué conseguir igual crecimiento de grieta en el ensayo y en servicio, en el caso de que la vida de la estructura coincidiera exactamente con la exigida.

Se tomó como origen de partida la ecuación de Paris, que expresa la velocidad de propagación de una grieta en función del factor de intensidad de tensión y de ciertas constantes características del material.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (1)$$

a: semilongitud (longitud) de la grieta.  
 N: nº de ciclos de tensión.  
 C, m: constantes características del material.  
 $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$  F: rango del factor de intensidad de tensión.  
 $\Delta \sigma$ : rango de tensión nominal a que está sometida la grieta.  
 F: Factor de corrección.

Esta ecuación es aplicable para valores del rango del factor de intensidad de tensión superiores a un valor umbral  $\Delta K_{th}$ .

La aplicación de la ecuación de Paris presentó los siguientes problemas:

a) No se disponía de una estructura igual a la del ensayo, que estuviese prestando servicio, por lo que las medidas experimentales que se podrían realizar no eran tensiones, sino otros parámetros que habría que elegir de forma que fueran representativos de las sollicitaciones dinámicas a evaluar.

b) Las señales medidas experimentalmente serían señales aleatorias en las que habría que identificar ciclos completos.

c) Debía determinarse el valor umbral de la sollicitación  $\Delta S_{th}$ , equivalente al valor umbral  $\Delta K_{th}$ , por debajo del cual se podría considerar que la grieta no propaga.

Estos problemas se resolvieron del siguiente modo:

a) Se han considerado parámetros que, no siendo tensiones en puntos de la estructura pueden considerarse proporcionales a ellas (aceleraciones y fuerzas):

$$\Delta \sigma = \tau \Delta S \quad (2)$$

$\Delta \sigma$ : rango de tensión.  
 $\Delta S$ : rango del parámetro representativo de la sollicitación.  
 $\tau$ : contante de proporcionalidad.

b) Se ha utilizado el método "rainflow" [5] para efectuar el recuento de ciclos de sollicitación y transformar la señal aleatoria medida, en un conjunto equivalente de sollicitaciones sinusoidales definidas por pares de valores:

$$\begin{matrix} \Delta S_1 & N_1 \\ \Delta S_2 & N_2 \\ : & : \\ : & : \\ \Delta S_n & N_n \end{matrix} \quad (3)$$

$\Delta S_i$ : rango del parámetro medido.  
 $N_i$ : número de ciclos del rango  $\Delta S_i$

La estructura a ensayar ha sido concebida para prestar servicio en la línea ferroviaria San Sebastián - Hendaya. Las sollicitaciones dinámicas a las que estará

sometida en servicio serán M veces las correspondientes a un recorrido completo (ida y vuelta), siendo M el número total de recorridos que se ha previsto va a realizar el vehículo durante su vida.

En el desarrollo de la presente ponencia se considerará que los pares de valores (3) representan las sollicitaciones de un único recorrido.

c) Para determinar el valor umbral del parámetro de medida, equivalente al valor umbral del factor de intensidad de tensión, se ha seguido el siguiente razonamiento:

La integración de la ecuación de Paris, bajo la hipótesis de que el factor de corrección F no varía al crecer la grieta y suponiendo que las sollicitaciones son repetitivas entre diferentes recorridos de un mismo trayecto, conduce a la expresión:

$$\frac{2[1 - (a_0/a_f)^{m/2-1}]}{(m-2)C\pi^{m/2}F^m a_0^{m/2-1} M \Sigma [N_i(\Delta \sigma_i)^m]} = 1 \quad (4)$$

suponiendo que el tamaño inicial de grieta es mucho menor que el tamaño final ( $a_0 \ll a_f$ ) y sustituyendo la expresión (2) que relaciona tensiones y sollicitaciones, se obtiene una expresión del coeficiente  $\tau$ , necesario para que el material rompa al final de la vida de servicio prevista (M recorridos).

$$\tau^m = 2 / \{ (m-2)C\pi^{m/2}F^m a_0^{m/2-1} M \Sigma [N_i(\Delta S_i)^m] \} \quad (5)$$

En esta expresión el sumatorio debe extenderse a todos los rangos de sollicitaciones que den lugar a factores de intensidad de tensión superiores al umbral de propagación de grietas. Supuesto un tamaño inicial de grieta  $a_0$ , puede calcularse el umbral de sollicitación  $\Delta S_{th}$  por debajo del cual no propaga la grieta, según la fórmula

$$\Delta S_{th} = \Delta K_{th} / (\tau F \sqrt{\pi a_0}) \quad (6)$$

Fijado un tamaño inicial de grieta  $a_0$ , las expresiones (5) y (6) constituyen un sistema no lineal de dos ecuaciones con dos incógnitas  $\tau$  y  $\Delta S_{th}$ . Su resolución permite determinar el valor umbral de sollicitaciones  $\Delta S_{th}$ .

Las sollicitaciones equivalentes de ensayo serán las que den un crecimiento de grieta igual al de las sollicitaciones en servicio. Para un material y geometría dados el crecimiento de la grieta debido a la aplicación de  $N_i$  ciclos de sollicitación de rango  $\Delta S_i$  depende del producto  $[N_i(\Delta S_i)^m]$ . Igualando el término correspondiente a cargas y ciclos de ensayo con el asociado a las cargas de servicio se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_{eq} (\Delta S_{eq})^m = M \Sigma_{i=k}^n [N_i(\Delta S_i)^m] \quad (7)$$

(siendo  $k$ , tal que  $\Delta S_k > \Delta S_{th}$ )

que relaciona la duración  $N_{eq}$  y rango de sollicitación  $\Delta S_{eq}$  de ensayo. En la expresión (7) el número de términos a incluir en el sumatorio depende del valor  $\Delta S_{th}$  que a su vez depende del tamaño inicial de grieta supuesto.

La determinación de rangos equivalentes de sollicitaciones se ha efectuado bajo la hipótesis de que la vida de la estructura es exactamente la de servicio previsto (M recorridos). Si la vida real es mayor, de (5)  $\tau$  resultaría más pequeño, y de (6)  $\Delta S_{th}$  sería mayor, por lo que el rango de sollicitaciones equivalentes que debería aplicarse sería menor que el calculado; de esta forma el ensayo resulta más severo que el servicio real, sin embargo la estructura tampoco romperá durante el ensayo. Siguiendo un razonamiento análogo, si por el contrario la estructura falla en servicio antes de llegar a M recorridos, el rango de sollicitaciones calculado resulta inferior al realmente equivalente y el ensayo será menos severo que el servicio real. A pesar de ello, la estructura también fallará en el ensayo.

Como consecuencia, siguiendo el criterio expuesto, si la estructura falla en servicio también fallará en el ensayo, y si no se produce el fallo en servicio, tampoco deberá fallar en el ensayo.

En la figura 1 se ha representado la variación del rango de aceleraciones verticales equivalentes y del valor umbral de propagación de grietas en función de su tamaño inicial. Puede observarse que el valor umbral de propagación disminuye conforme aumenta el tamaño inicial de grieta considerado. Como consecuencia de la disminución del valor umbral, crece el rango de sollicitaciones equivalente, ya que en el sumatorio de (7) son más rangos de sollicitación los que colaboran a la propagación de la grieta.

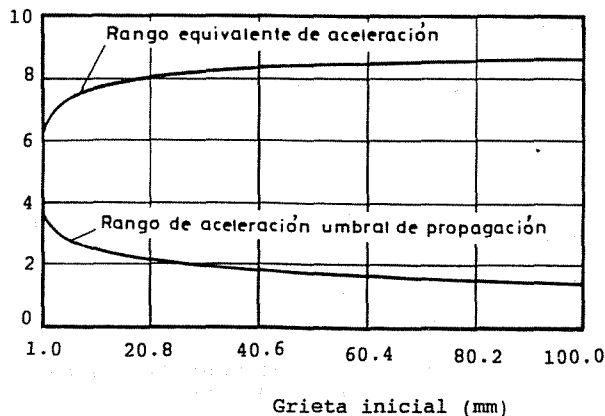


Figura 1. Variación del rango equivalente de aceleración vertical y del umbral de propagación de grietas en función del tamaño inicial de grieta.

La determinación de las condiciones de

ensayo bajo la hipótesis de existencia de grietas iniciales de gran tamaño resulta conservadora y lo hace más severo.

#### 4. ENSAYOS Y CALCULOS PREVIOS.

Para poder establecer las condiciones del ensayo a fatiga eran necesarios ciertos datos de partida, que han sido obtenidos a partir de ensayos previos. En este apartado se describen los ensayos realizados y sus resultados.

##### 4.1. Medida de las tensiones estáticas.

Se midieron las tensiones originadas en la estructura al someterla a las hipótesis de carga habituales en la estructura de caja de un vehículo ferroviario (carga vertical, compresión entre topes, compresión diagonal,...).

Los resultados de este ensayo pusieron de manifiesto que las zonas más sollicitadas eran las que ya se habían detectado en un cálculo previo, por el Método de Elementos Finitos.

De todas las hipótesis de carga consideradas, ha sido la de carga vertical la que ha proporcionado los datos necesarios para el ensayo a fatiga.

TABLA 1. Comparación entre tensiones estáticas y dinámicas

Punto	(1) MPa	(2) MPa	(3)	(4)
47	23,7	20,5	27,5	1,34
48	21,6	18,7	24,0	1,28
180	-22,3	19,3	7,9	0,41
181	-41,0	35,5	32,8	0,92
182	-12,9	11,2	30,1	2,69
183	23,0	19,9	34,9	1,76
184	-41,0	35,5	33,0	0,93
185	42,4	36,7	36,7	1,00
186	-39,5	34,2	29,5	0,86
187	-38,1	33,0	28,7	0,87
194	-15,8	13,7	24,0	1,75
195	29,5	25,5	36,2	1,42
196	38,1	33,0	36,8	1,11
197	-37,4	32,4	-	-
198	-24,4	21,1	30,4	1,44
199	16,5	14,3	19,0	1,33

(1) Tensiones estáticas medidas bajo una carga vertical de 194.040 N.

(2) Rango de tensiones dinámicas a conseguir durante la primera fase del ensayo ( $\Delta\sigma_{(2)} = |\sigma_{(1)}| \cdot (\Delta A_{veq}/g)$ )

(3) Rangos de tensiones dinámicas medido al excitar la estructura según el primer modo de flexión, con un nivel de sollicitación que permite alcanzar en el punto más sollicitado (185) el valor que se quiere reproducir.

(4) Relación entre los rangos de tensión medidos y los deseados en cada punto.

En la tabla 1 se recogen los valores de las tensiones medidas bajo una carga vertical estática de 194.040 N en los puntos en los que se han medido las mayores tensiones en esta hipótesis. Esta carga de 194.040 N es la suma del peso de la caja junto con todos los equipos en ella instalados y la carga máxima de viajeros prevista para su servicio. También se recogen en la tabla 1 otros valores que se comentarán más adelante.

En la figura 2 se representa esquemáticamente la situación de los puntos referidos en la tabla 1.

4.2. Medida de rigidez torsional.

Se realizó una medida de rigidez torsional de la estructura ensayada ( $K_t$ ), obteniéndose un valor, expresado como relación Fuerza/desplazamiento por apoyo de caja

$$K_t = 7.795 \cdot 10^3 \text{ N/m}$$

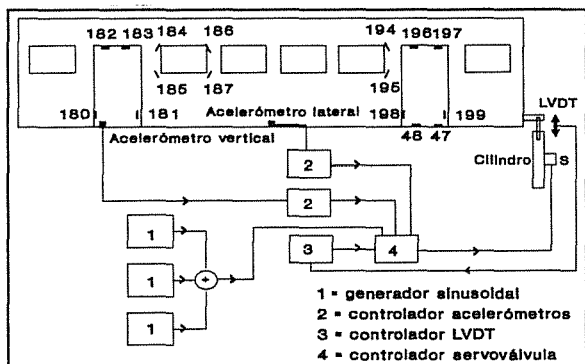


Figura.2. Situación de los puntos más solicitados e instrumentación del ensayo.

4.3. Medidas en vía

Para evaluar las sollicitaciones dinámicas a que estará sometida la estructura durante su servicio, se ha efectuado una prueba de circulación en vía en la línea San Sebastián - Hendaya con un vehículo dinámicamente similar al de ensayo, aunque con la caja fabricada en acero al carbono.

En la tabla 2 se indican los parámetros medidos para evaluar cada uno de los tipos de sollicitación considerados en el ensayo.

TABLA 2. Parámetros medidos durante la prueba de circulación en vía

Sollicitación	Parámetro(s) de medida
Vertical	Acel. vert.sobre pivote
Lateral	Acel. lat. sobre pivote
Torsión	Fuerzas vert.suspensión

4.4. Análisis modal

Para determinar las frecuencias naturales de los modos de vibración que se querían excitar se realizó un ensayo de análisis modal de la estructura.

En la tabla 3 se recogen los resultados obtenidos.

TABLA 3. Frecuencias naturales asociadas a los modos de vibración excitados en el ensayo a fatiga.

Modo de vibración	Frecuencia (Hz)
Modo 1 de flexión vertical	6.2
Modo 1 de flexión lateral	8.5
Modo 1 de torsión	17.8

5. DEFINICION DE LAS SOLICITACIONES DE ENSAYO

5.1. Datos característicos del material

Los valores característicos del material utilizado en la estructura se han obtenido por ajuste de la ecuación de Paris a los resultados experimentales proporcionados en la referencia [6], obtenidos con mayor relación de tensiones.

Los valores resultantes fueron

$$C = 1.4212 \cdot 10^{-10}$$

$$m = 3.4499$$

$$\Delta K_{th} = 1$$

aplicables en la ecuación de Paris expresando las tensiones en MPa y el tamaño de grieta en metros.

5.2. Rango de sollicitaciones equivalentes

Con los parámetros medidos durante las pruebas de circulación en vía se ha efectuado un recuento de ciclos según el método "rainflow". En la figura 3 se han representado los resultados correspondientes a la sollicitación vertical. Para cada rango de tensiones, la figura proporciona el número de ciclos de sollicitación medidos en un recorrido.

Estos resultados han sido los utilizados para determinar las sollicitaciones equivalentes a considerar en el ensayo a fatiga.

El número de recorridos M que el vehículo realiza a lo largo de su vida se calculó mayorando en un 30% el número de viajes estimado. Esta estimación se realizó bajo criterios de elevada utilización de este tipo de material:

- 8 recorridos/día
- 333 días de servicio/año
- 30 años de vida

Aplicando estos criterios se obtiene un número total de recorridos

$$M = 104.000 \text{ recorridos}$$

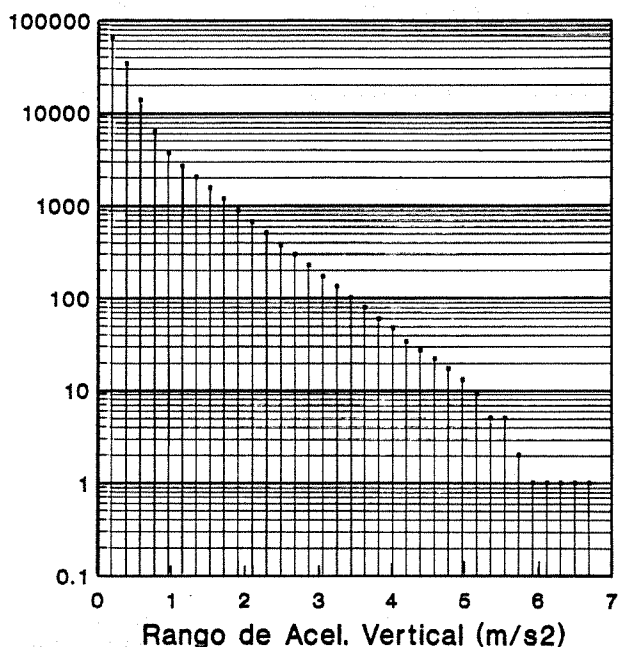


Figura 3. Resultado del recuento de ciclos de aceleración vertical.

#### 5.2.1 Primera fase del ensayo.

La primera fase del ensayo fué de aplicación de sólo carga vertical.

El parámetro medido experimentalmente para evaluar la sollicitación vertical ha sido la aceleración vertical ( $A_v$ ) en caja, sobre uno de los pivotes.

Fijada la duración de esta fase en dos millones de ciclos y estimado un tamaño inicial de grieta  $a_0 = 0.05$  m, muy superior al máximo previsible en la estructura, a partir de las ecuaciones (5), (6) y (7) se calculó el rango de aceleraciones equivalentes, resultando  $\Delta A_{veq} = 8,5$  m/s<sup>2</sup>.

Este valor equivalente de aceleración se tradujo en un valor equivalente de tensión. Denominando  $\sigma_v$  la tensión estática en un punto, en condiciones de carga máxima, el rango de tensiones  $\Delta \sigma_{veq}$  debido a  $\Delta A_{veq}$ , bajo la hipótesis de que las frecuencias asociadas a las sollicitaciones son bajas, se aproximó por:

$$\Delta \sigma_{veq} = \Delta A_{veq} \sigma_v / g \quad (8)$$

g: aceleración de la gravedad.

Las tensiones de ensayo calculadas según (8), las dinámicas según el modo de flexión vertical y el cociente entre ambas se incluyen en la tabla 1.

De los resultados incluidos en esta tabla se deduce que, como cabía esperar, la correlación entre tensiones estáticas y dinámicas no es elevada. Sin embargo, el punto de máxima tensión coincide aproximadamente en ambas, y en general en los puntos más solicitados la relación tensiones dinámicas/tensiones estáticas es del orden de 1 o superior.

#### 5.2.2. Segunda fase del ensayo.

En la segunda fase se aplicaron conjuntamente los tres tipos de sollicitación más importantes en esta estructura: vertical, lateral y torsión. Se han excitado para ello simultáneamente los tres modos representativos de estas cargas ( modo de flexión vertical, modo de flexión lateral y modo de torsión ).

El número de ciclos de carga vertical ( $N_{eqv}$ ) a aplicar en esta fase se fijó en 2 millones, quedando definidos los números de ciclos de carga lateral ( $N_{eql}$ ) y de torsión ( $N_{eqt}$ ) por las relaciones de frecuencias respecto del modo vertical.

A partir del recuento de ciclos de las medidas experimentales y teniendo en cuenta el número de ciclos de ensayo, se han calculado los rangos de sollicitación equivalentes. Se ha considerado un valor umbral de propagación nulo, ya que al calcular los rangos equivalentes independientemente no es válido considerar un valor umbral en cada uno de los parámetros porque ello supondría considerar una adición de  $\Delta K_{th}$  que no es cierta.

Esta condición de  $\Delta K_{th} = 0$  es un criterio conservador, ya que los rangos de sollicitación equivalentes así obtenidos son superiores a los que se obtendrían considerando un valor  $\Delta K_{th} \neq 0$ . Los rangos de sollicitación resultantes han sido:

$$\begin{aligned} \Delta A_{veq} &= 9,14 \text{ m/s}^2 \\ \Delta A_{leq} &= 5,98 \text{ m/s}^2 \\ \Delta F_{teq} &= 1.797 \text{ N/apoyo suspensión} \end{aligned}$$

El control de cada una de las sollicitaciones se ha realizado mediante los siguientes parámetros de control:

- Flexión vertical: se ha elegido un punto de medida de tensiones, poco influido por la carga lateral.

- Flexión lateral: se ha utilizado la aceleración lateral en el centro de caja, excitándose la estructura con un nivel de sollicitación que diera en ese punto una aceleración de valor  $\pm \frac{1}{2} \Delta A_{leq}$ .

- Torsión: Conocido el rango equivalente de la fuerza de torsión ( $\Delta F_{teq}$ ) y a partir de la rigidez torsional de la estructura ( $K_t$ ), se ha calculado la aceleración de torsión sobre los apoyos de la suspensión ( $\Delta A_{teq}$ ) por medio de la relación:

$$A_{teq} = (\Delta F_{eq}/K_t)(2\pi f_t)^2 = 2,88 \text{ m/s}^2$$

Se controla la sollicitación de torsión midiendo esta aceleración en los apoyos de la suspensión.

6. LIMITACIONES DE LA METODOLOGIA UTILIZADA

La principal limitación de la metodología de ensayo propuesta proviene de la diferente distribución de tensiones en el ensayo y en servicio. Debido al filtrado producido por la suspensión las sollicitaciones que llegan a la caja concentran principalmente su energía en frecuencias bajas próximas a las de los modos de vibración como sólido rígido y a las de los primeros modos estructurales. Como consecuencia, son los modos de vibración de frecuencia más baja los que colaboran de forma más importante a las tensiones inducidas en la estructura.

La utilización de un único modo de vibración para simular cada sollicitación conlleva el error asociado a la contribución del resto de los modos de vibración a la distribución de tensiones en servicio. El ajuste de la amplitud modal para conseguir un nivel de sollicitaciones global similar al producido en vía da lugar a tensiones superiores a las de servicio en ciertas zonas de la estructura, e inferiores en otras.

Otra fuente posible de imprecisión es la relacionada con la utilización de aceleraciones medidas en pivote para evaluar las sollicitaciones. Estas aceleraciones son el resultado de una combinación de movimientos inducidos, no sólo por las sollicitaciones de ensayo, sino también por otras no consideradas en el mismo. Sin embargo, el nivel de aceleraciones dinámicas en el pivote es superior a la media existente en la caja y en ese sentido tomar estos parámetros como referencia para definir las sollicitaciones dinámicas de ensayo también puede considerarse del lado de la seguridad.

Finalmente analizaremos las diferencias que cabe esperar entre el comportamiento en el ensayo y en la realidad, derivadas de la aplicación de una combinación de cargas sinusoidales en un caso y aleatorias en el otro. Para ello se ha efectuado una comparación de la fatiga acumulada en ambos casos, representada por el término  $\sum N_i (\Delta\sigma_i)^m$ , en función del valor relativo de tensiones inducidas en un mismo punto por distintas sollicitaciones.

En la figura 4 se ha representado la fatiga acumulada correspondiente a cargas vertical y lateral, combinadas sinusoidal y aleatoriamente. La tensión en el punto de cálculo considerado se ha obtenido mediante la fórmula

$$\sigma = C_V S_V + C_L S_L \tag{9}$$

siendo

$S_V, S_L$  = Valor de las sollicitaciones vertical y lateral

$C_V, C_L$  = Coeficientes que relacionan las sollicitaciones vertical y lateral con las tensiones en el punto considerado.

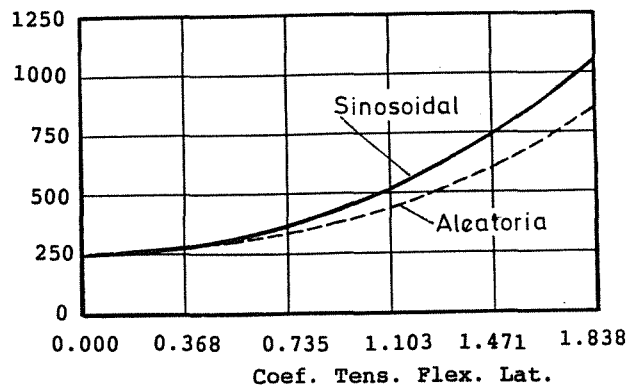


Figura 4. Comparación de fatiga acumulada bajo combinación de cargas sinusoidales y aleatorias (MPa.ciclo/10<sup>7</sup>), para sollicitaciones verticales y laterales.

El rango de variación del coeficiente  $C_L$  se ha elegido de forma que su valor máximo produce una fatiga similar a la producida por la sollicitación vertical.

El cálculo de la fatiga acumulada bajo combinación de cargas aleatorias se ha realizado bajo la hipótesis de que existe la misma probabilidad que se produzca simultáneamente un ciclo de cargas verticales con cualquiera de los ciclos laterales. Se ha supuesto que los rangos de tensión de ambos tipos de carga siempre se suman. Este hecho unido a la hipótesis de que se producen simultáneamente los ciclos de carga vertical y lateral hace que la estimación de fatiga acumulada bajo combinación de carga aleatoria pueda considerarse superior a la real. A pesar de ello, la figura 4 demuestra que la fatiga acumulada bajo combinación de cargas sinusoidales es en todos los casos superior a la producida bajo cargas aleatorias, lo que indica que, bajo este aspecto, el ensayo se ha realizado en condiciones más severas que las reales.

7. REALIZACION DEL ENSAYO. RESULTADOS

La metodología descrita en los apartados previos se ha aplicado al ensayo a fatiga de una estructura de caja ferroviaria, correspondiente al remolque intermedio de una unidad de cercanías.

La excitación de vibraciones se realizó a través de un actuador hidráulico que se conectó a uno de los extremos de la estructura. El actuador se montó en posición vertical durante la primera fase de ensayos y en posición inclinada en el resto, con el fin de excitar simultáneamente los tres modos de ensayo.

En la figura 2 se describe de forma esquemática la instrumentación utilizada.

Las fases 1 y 2 tuvieron una duración de dos millones de ciclos cada una. Además se realizó una tercera fase de incremento de cargas hasta rotura.

En las dos primeras fases de ensayo se realizaron revisiones periódicas cada 500.000 ciclos para la detección de grietas mediante la aplicación de líquidos penetrantes. En la tercera fase se incrementaron las cargas en un 10% cada 200.000 ciclos. Coincidiendo con la finalización de cada escalón de cargas se realizó una inspección de la estructura.

Al final del tercer escalón de la tercera fase de ensayos se detectó una grieta de 245 mm de longitud en la unión en que un soporte añadido a la estructura original, para conexión del actuador de ensayo, se fijaba a la misma. La grieta creció hacia la chapa de revestimiento, por lo que se decidió finalizar el ensayo sin que se produjesen roturas en elementos correspondientes a la estructura original.

#### 8. CONCLUSIONES

- Se ha establecido una metodología que, aunque con limitaciones evidentes, permite ensayar a fatiga estructuras de caja ferroviarias.

- Aunque el hecho de que la estructura soporte el ensayo no permite garantizar la resistencia de todos sus puntos en servicio, el ensayo permite controlar de forma satisfactoria la mayoría de las uniones soldadas y de esta forma su calidad global de fabricación.

- La sintonización simultánea de varios modos de vibración supone un avance respecto de ensayos similares realizados con anterioridad, y mejora de forma notable la precisión del método.

- La metodología establecida para la determinación de los rangos de sollicitación equivalente es general y puede ser utilizada también en otras aplicaciones.

#### 9. REFERENCIAS

- [1] Giménez J.G., Egaña J.M., "Aplicación de Métodos Numéricos al Cálculo de Estructuras Ferroviarias", Simposium Internacional del Transporte, Moscú, Junio, 1986
- [2] Sanz R., "Visita al Centro de Investigación de Alusuisse en Neuhausen, Suiza", Informe interno, C.A.F., 1986
- [3] Boutonnet J.C., "L'Aluminium dans la Construction du Materiel Ferroviaire", Revue Generale des Chemins de Fer, 99 année, avril 1980
- [4] Gurney T.R., "Fatigue of Welded Structures", Second Edition, Cambridge University Press, 1979
- [5] Fuchs H.O., Stephens R.I., "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley and Sons, 1980
- [6] Lewis J.A., "Absolute and Relative Thresholds in Medium strength Steels and Aluminium Alloys", Fatigue 84, Vol 1, pp 265-274, Edit. EMAS, 1984