



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales**

**Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales**

## **TESIS DOCTORAL**

# **OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE SUJECCIÓN PARA VÍAS DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA**



**Autor: Isidro Alfonso Carrascal Vaquero**

**Directores: Federico Gutiérrez-Solana Salcedo  
Juan Antonio Polanco Madrazo**

**Santander, Mayo 2006**

## CAPÍTULO 4

### **METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SUJECIÓN**

#### **1 GENERALIDADES**

Con las pruebas desarrolladas para la caracterización del comportamiento mecánico de la sujeción se trata de establecer la respuesta que ésta ofrece a todos los esfuerzos que sobre ella pueden actuar, y que han sido descritos en el capítulo anterior, para establecer un marco que permita su diseño optimizado en aras de establecer un comportamiento resistente y duradero.

La metodología experimental se basa, fundamentalmente, en el “Pliego de bases para el suministro de sujeciones” establecido por el Gestor de Infraestructura Ferroviaria, GIF [7]. También, se han empleado otros documentos de apoyo, entre los que se encuentran, básicamente, la normativa europea y española [47-65] y algún trabajo de carácter individual [66].

Los ensayos se han dividido en cuatro grupos principales:

- Ensayos sobre el elemento muelle
- Ensayos sobre el elemento de anclaje
- Ensayos sobre el elemento de apoyo, o placa de asiento
- Ensayos sobre el conjunto de la sujeción

El esquema seguido en el presente capítulo, será el de revisar todos y cada uno de los ensayos que permitirán analizar el comportamiento de la sujeción, atendiendo a la siguiente estructura:

- Justificación del ensayo
- Metodología:
  - Descripción del ensayo según la normativa vigente
  - Metodología experimental adoptada: Interpretación de la normativa y solución adoptada para la realización de los ensayos
  - Equipamiento necesario para la realización del ensayo
  - Parámetros de ensayo
- Resultados obtenidos y valores límite indicados en la especificación

Se dejan fuera de este capítulo algunas pruebas dirigidas a la caracterización de componentes concretos y que se verán, con más detalle, al estudiar estos elementos de la sujeción por separado.

## **2 ENSAYOS SOBRE EL ELEMENTO MUELLE**

### **2.1 FUERZA DE APRIETE**

#### **2.1.1 Justificación del ensayo**

El apriete es un parámetro básico del elemento muelle de un sistema elástico de sujeción. Se define como la fuerza vertical aplicada a la superficie superior de la base del carril por las grapas de sujeción. Se trata, por tanto, de conocer la fuerza que transmite el elemento muelle sobre la base del carril que sujeta.

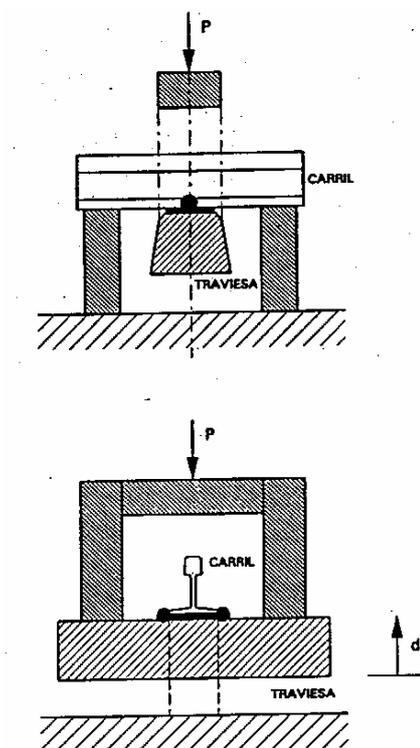
En servicio, la sujeción debe presentar una respuesta elástica a los movimientos relativos entre carril y traviesa en sentido vertical, capaz de tolerar la deflexión del carril y evitar el levantamiento del mismo.

Además, debe mantener dentro de unos niveles convenientes la progresión del esfuerzo en función de la magnitud del desplazamiento vertical y proporcionar una coacción permanente entre carril, placa de asiento y traviesa.

## 2.1.2 Metodología

### 2.1.2.1 Descripción del ensayo según norma

El conjunto de la sujeción se dispone sobre una porción de traviesa. Todo ello se suspende del carril tal como se muestra en la Figura 4.1, apoyando los extremos de éste sobre dos pilares rígidos.



**Figura 4.1.** Configuración del ensayo de fuerza de apriete [7]

La carga se aplica con un elemento puente que actúa sobre la semitraviesa a ambos lados de la ubicación del carril. Para determinar los movimientos

verticales relativos entre traviesa y carril se colocan dos transductores de desplazamiento próximos a la unión entre dichos elementos.

Para la realización del ensayo, en primer lugar se ajustan a cero los transductores de desplazamientos ( $d = 0$ ), tras lo cual se aplica una carga creciente  $P_i$  sobre la traviesa. Dicha carga tiende a separar la traviesa del carril, dado que está suspendida de él a través del elemento muelle del sistema de sujeción. Cuando la placa de asiento queda liberada a una carga  $P_1^i$ , se extrae de debajo del carril, procediéndose, a continuación, a disminuir la carga aplicada hasta alcanzar un valor inferior a 2 kN o hasta que se produzca el contacto del carril con la traviesa.

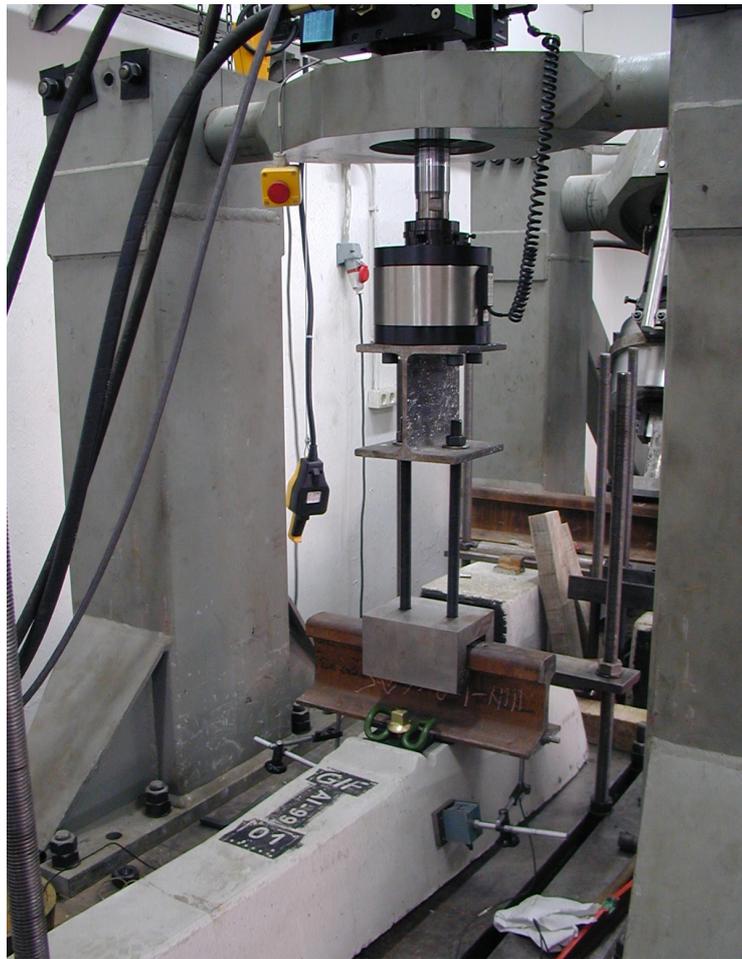
Posteriormente se vuelve a cargar con una velocidad de carga  $v$ , definiéndose la curva carga-desplazamiento. Cuando los transductores de desplazamientos pasen por el cero ( $d = 0$ ), se obtiene la carga  $P_0^i$  (fuerza de apriete).

Estas operaciones se realizan tres veces sobre el mismo conjunto, obteniéndose el valor  $P_0$  como media de las tres medidas.

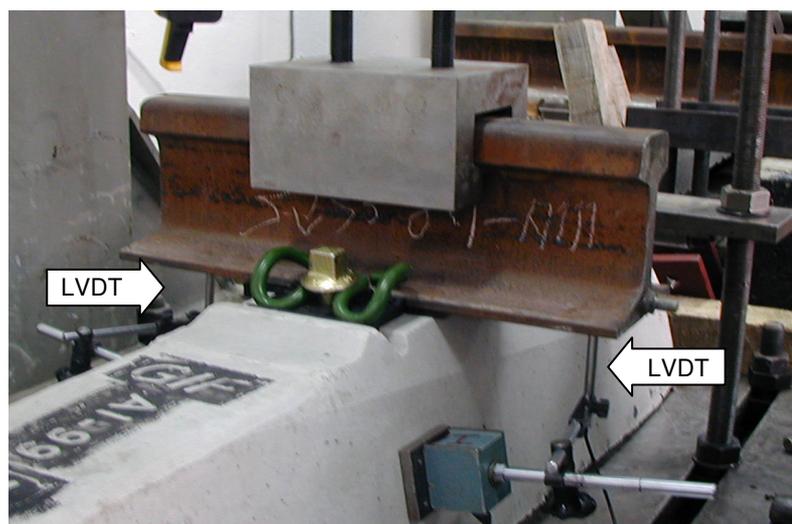
#### *2.1.2.2 Metodología experimental adoptada*

Para la realización del ensayo de fuerza de apriete el esquema adoptado difiere ligeramente del propuesto en la especificación técnica, descrito en el apartado 2.1.2.1, así, en lugar de fijar la posición del carril y desplazar la traviesa por medio de un esfuerzo de compresión, se ancla la traviesa a la bancada de la máquina de ensayo y se aplica un esfuerzo de tracción sobre el carril (Figura 4.2).

En contacto con la base del cupón de carril y sujetos a la traviesa o semitraviesa, se sitúan dos comparadores LVDT posicionados en el eje del hilo, uno a cada lado de la traviesa (Figura 4.3).



**Figura 4.2.** *Dispositivo empleado en el ensayo de fuerza de apriete*



**Figura 4.3.** *Detalle del dispositivo empleado en el ensayo de fuerza de apriete, junto con la colocación de los captadores de desplazamiento*

A través del cupón del carril se aplica una fuerza de tracción tendente a producir la separación entre el carril y la traviesa. Se realiza un registro continuo de datos de la carga de tracción aplicada y del desplazamiento relativo entre traviesa y carril, obtenido como media aritmética de la lectura realizada por los dos comparadores. Una vez alcanzada la fuerza necesaria para producir la separación entre el carril y la traviesa, se retira la placa de asiento manualmente, como se puede observar en la Figura 4.4.

A continuación, se procede a descargar el conjunto hasta alcanzar las condiciones iniciales del ensayo, es decir, se recupera el posicionamiento original del carril con respecto de la traviesa cuando estaba colocada la placa de asiento. El valor de carga registrado, en estas condiciones, se considera como la fuerza de apriete del sistema de la sujeción,  $P_0$ , para el par de apriete nominal aplicado. Esta prueba se repite tres veces sobre el mismo conjunto de sujeción.



**Figura 4.4.** *Retirada de la placa de asiento en el ensayo de fuerza de apriete*

### *2.1.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo*

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 30 kN que pueda adaptarse a la velocidad de carga especificada y dos captadores de desplazamientos con un rango mínimo de 10 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. La aplicación de la carga, para separar el carril de la traviesa, se realizará por medio de un útil específico

(Figura 4.2). Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento.

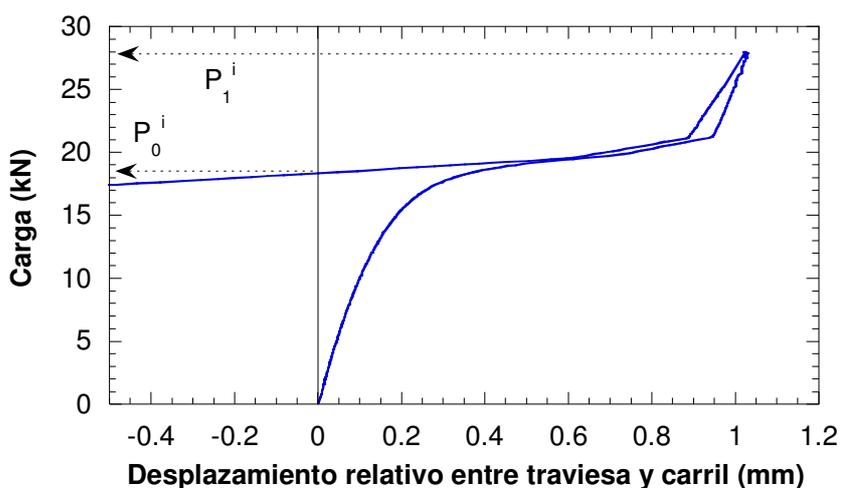
#### 2.1.2.4 Parámetros de ensayo

- ❑ Velocidad de carga ( $v$ ):  $10 \pm 1$  kN/min
- ❑ Máxima carga aplicada sobre el carril ( $P_{1,max}$ ): 30 kN
- ❑ Desplazamiento vertical relativo entre carril y traviesa ( $d$ )
- ❑ Fuerza de apriete ( $P_0$ )

#### 2.1.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

La fuerza de apriete ( $P_0^i$ ) es el valor de carga medido cuando el carril está en la situación de partida, una vez retirada la placa de asiento, es decir, que la célula de carga en ese momento está midiendo la fuerza que realizan los sistemas de anclaje sobre el carril. La fuerza de apriete ( $P_0$ ) se obtiene como la media aritmética de los valores obtenidos en los tres ensayos de que se compone la prueba.

En el gráfico de la Figura 4.5 se muestra la evolución de la carga aplicada sobre el carril frente al movimiento de este respecto a la traviesa para un ensayo concreto.



**Figura 4.5.** Determinación de la fuerza de apriete a partir del diagrama F-d

La especificación indica que la fuerza de apriete mínima es de 17 kN.

### **3 ENSAYOS SOBRE EL ELEMENTO DE ANCLAJE**

#### **3.1 CARGA VERTICAL**

##### **3.1.1 Justificación del ensayo**

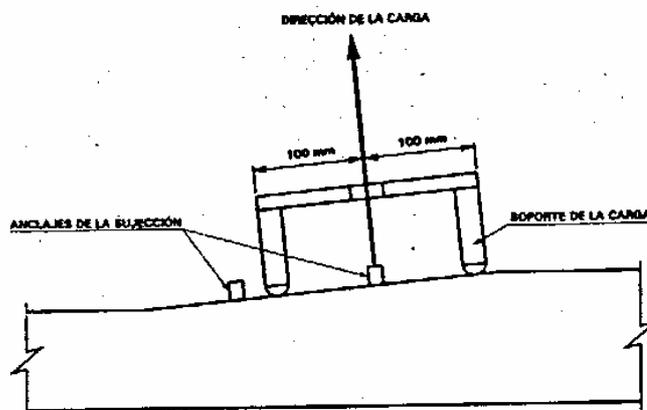
El elemento de anclaje debe permanecer fijo, embebido en el traviesa, para, de esta forma, asegurar un punto de referencia estable al resto de componentes de la sujeción que actúan de manera elástica. Dicha estabilidad se debe mantener al realizar las distintas operaciones que conlleva el montaje del conjunto de la sujeción, así como frente a los esfuerzos de arranque generados durante su vida en servicio.

##### **3.1.2 Metodología**

###### *3.1.2.1 Descripción del ensayo según norma*

Se aplica una fuerza creciente de extracción al inserto embebido en el interior de la traviesa y que sirve de anclaje a los elementos elásticos de la sujeción hasta alcanzar un valor mínimo  $Q$ , el cual se mantiene durante un tiempo  $t$ .

La configuración aconsejada para la realización del ensayo de fuerza de apriete se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Configuración del ensayo de carga vertical [7]

### 3.1.2.2 Metodología experimental adoptada

Para realizar el ensayo, al elemento que se introduce en el inserto embebido en la traviesa, se le suelda una barra maciza con el objeto de poder atenzarlo con la mordaza de la máquina de ensayos y ejercer la correspondiente fuerza de tracción-extracción. La traviesa se sujeta en la bancada de la máquina de ensayos acuñada de tal forma que el eje del inserto coincide, en todo momento, con el eje del actuador que proporciona la carga.

La sujeción de la traviesa a la bancada se realiza por medio de un pórtico doble con dos anclajes colocados a ambos lados de la traviesa. Los travesaños de cada pórtico se colocan separados una distancia de 100 mm con respecto del inserto embebido en el hormigón, como se muestra en las Figura 4.7



**Figura 4.7.** *Dispositivo empleado en el ensayo de carga vertical, vista frontal (antes de la extracción)*

Una vez montado el dispositivo de ensayo, se aplica una carga creciente a una velocidad de 1 kN/s hasta alcanzar el valor de 60 kN. Esta carga se mantiene estable durante 3 minutos, transcurridos los cuales se procede a determinar la resistencia del anclaje a la extracción, por medio de la aplicación de un mayor esfuerzo de tracción, hasta alcanzar las condiciones que limitan su uso. En la

Figura 4.8, se muestra el resultado final conseguido, una vez propiciada la extracción.



**Figura 4.8.** *Dispositivo empleado en el ensayo de carga vertical, vista lateral (después de la extracción)*

### *3.1.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo*

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 200 kN en tracción, con posibilidad de adaptarse a la velocidad de carga especificada y con un sistema para el anclaje de la traviesa a la parte fija de la misma. La aplicación de la carga, para poder extraer el elemento embebido en la traviesa, se realizará por medio de un útil específico. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento.

### *3.1.2.4 Parámetros de ensayo*

- Velocidad de carga ( $v$ ):  $50 \pm 10$  kN/min
- Carga mínima ( $Q$ ): 60 kN
- Tiempo de mantenimiento de la carga ( $t$ ): 3 min
- Carga de extracción ( $Q_e$ )

### 3.1.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

El resultado del ensayo será positivo si transcurridos los 3 minutos en los que se mantienen los 60 kN no aparece daño alguno sobre el sistema. Por el contrario, si a lo largo de estos tres minutos, se manifiesta algún síntoma de deterioro, se considerará como no superado.

Transcurridos los tres minutos de ensayo, se sigue cargando hasta obtener la carga de extracción o carga máxima alcanzada antes de la rotura del sistema ( $Q_e$ ), que, para que el resultado del ensayo fuese correcto, deberá ser, lógicamente, superior a 60 kN.

En la Figura 4.9, se muestra una curva tipo registrada obtenida en un ensayo de extracción, donde puede apreciarse, perfectamente, la fluencia que se produce a lo largo de los 3 minutos de estabilización de la carga.

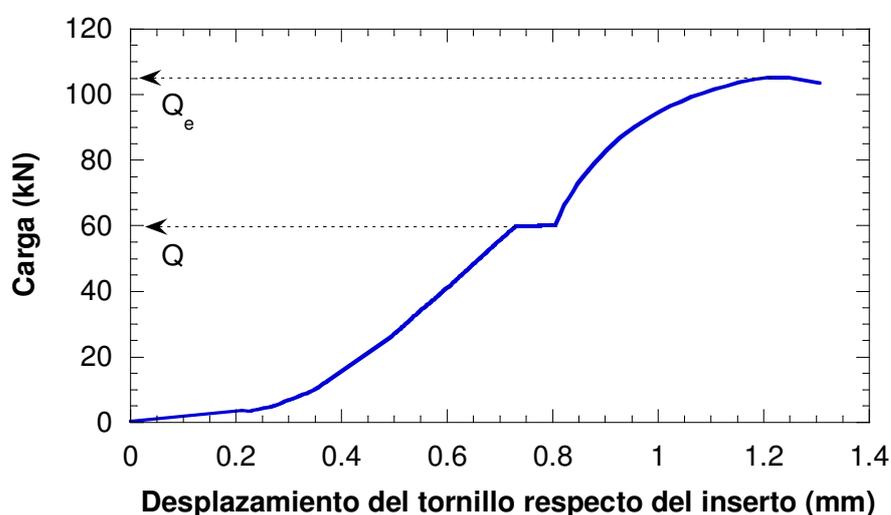


Figura 4.9. Curva carga-desplazamiento en el ensayo de carga vertical

## **4 ENSAYOS SOBRE EL ELEMENTO DE APOYO, O PLACA DE ASIENTO**

El elemento de apoyo o placa de asiento es una pieza esencial en el conjunto de la sujeción, ya que es el encargado de amortiguar las vibraciones y de proteger el balasto frente a las acciones derivadas del tráfico de los ferrocarriles. Dado que la circulación de las cargas origina esfuerzos tanto de naturaleza estática como dinámica, será necesario comprobar el comportamiento de las placas de asiento ante ambos tipos de acciones. Esto conduce a definir ensayos que permitan calibrar la rigidez de estos elementos ante toda clase de situaciones

### **4.1 RIGIDEZ VERTICAL SECANTE ESTÁTICA**

#### **4.1.1 Justificación de los ensayos**

Para la definición de la rigidez estática, será preciso considerar dos tipos de ensayos: aquéllos que analizan el comportamiento frente a las condiciones normales de explotación y los que permiten comprobar la protección que el elemento de apoyo ofrece a la traviesa y al balasto en el caso de cargas excepcionales causadas por defectos en el carril, en la rueda o en el asiento de la traviesa sobre el balasto, entre otras.

#### **4.1.2 Metodología**

##### *4.1.2.1 Descripción del ensayo según norma*

Para la obtención de la rigidez estática, la especificación propone ensayos aplicando una carga vertical progresiva sobre un cupón de carril colocado sobre el elemento de apoyo alojado, a su vez, en la traviesa a una velocidad de carga establecida, v.

La deformación de la placa de asiento (d) originada por la carga transmitida, o desplazamiento relativo entre carril y traviesa, se determina posicionando unos comparadores a ambos lados de la traviesa.

Para asegurar el perfecto acoplamiento de los distintos elementos, se especifican tres ciclos consecutivos de carga-descarga con un mantenimiento durante un minuto de la carga máxima aplicada.

La rigidez se calcula como el cociente entre un intervalo de cargas definido y la diferencia de deformación asociada en los límites de dichos intervalos.

La especificación recoge tres vías para la determinación de la rigidez vertical, que únicamente difieren en los niveles de carga a los que se realizan los ensayos y la velocidad con que se aplican dichos niveles. La denominación que reciben las tres alternativas es la siguiente:

- Rigidez vertical a 80 kN.
- Rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$ .
- Rigidez vertical secante 100/200 kN.

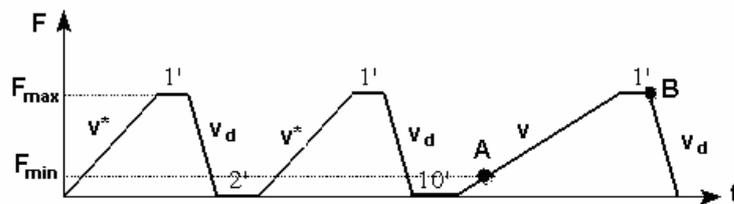
#### 4.1.2.2 Metodología experimental adoptada

La placa de asiento se coloca sobre un cupón obtenido de una traviesa provisto de cuatro captadores de desplazamiento LVDT. Sobre la placa se sitúa un cupón de carril de base rectificada en cuya parte central superior se ha practicado un hueco semiesférico en el que se aloja una bola que será la encargada de transmitir el esfuerzo realizado por la máquina sobre el elemento a ensayar, de forma que se evita la aplicación de cargas excéntricas no deseadas. El dispositivo empleado para la realización de los ensayos se muestra en la Figura 4.10.



**Figura 4.10.** *Dispositivo empleado para la realización de los ensayos de rigidez vertical estática*

La secuencia de esfuerzos aplicados se indica en el esquema de la Figura 4.11, donde se representan los tiempos de espera considerados entre cada ciclo de carga.



**Figura 4.11.** *Secuencia de cargas en los ensayos de rigidez vertical estática*

#### *4.1.2.3 Equipamiento necesario para la realización de los ensayos*

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 200 kN que pueda adaptarse a la velocidad de carga especificada y cuatro captadores de desplazamientos LVDT con un rango mínimo de 5 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. El dispositivo de ensayos estará formado por un cupón de carril con la parte inferior del patín

rectificada, con la posibilidad de adaptar una rótula en su parte superior para asegurar que la fuerza ejercida sobre el carril es perfectamente vertical y por un cupón de traviesa con la parte inferior rectificada, de modo que las dos caras, la de apoyo de la placa de asiento y la de apoyo del cupón con la máquina de ensayo, sean paralelas entre sí. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento.

#### 4.1.2.4 *Parámetros de ensayo*

##### 4.1.2.4.1 Rigidez vertical a 80 kN

- Fuerza máxima ( $F_{max}$ ): 80 kN
- Fuerza mínima ( $F_{min}$ ): 5 kN
- Velocidad de carga y descarga de los tres ciclos:  $50 \pm 5$  kN/min
- Desplazamiento en cada esquina del elemento de apoyo ( $d_i$ )
- Media de los cuatro desplazamientos  $d_i$  ( $d$ ):  $d = \frac{\sum_{i=1}^4 d_i}{4}$
- Rigidez vertical a 80 kN ( $k$ )

##### 4.1.2.4.2 Rigidez vertical secante $P_0/P_{0+75}$

- Fuerza de apriete por cada carril ( $P_0$ )
- Fuerza máxima ( $F_{max}$ ):  $P_{0+75}$  kN
- Fuerza mínima ( $F_{min}$ ):  $P_0$  kN
- Velocidad de carga del último ciclo ( $v$ ):  $5 \pm 1$  kN/min
- Velocidad de carga de los dos primeros ciclos ( $v^*$ ):  $15 \pm 1$  kN/min
- Velocidad de descarga ( $v_d$ ):  $50 \pm 5$  kN/min
- Desplazamiento de cada comparador ( $d_i$ )
- Media de los 4 desplazamientos  $d_i$  ( $d$ ):  $d = \frac{\sum_{i=1}^4 d_i}{4}$

- ❑ Rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$  kN ( $k_s$ )

#### 4.1.2.4.3 Rigidez vertical secante 100/200 kN

- ❑ Fuerza máxima ( $F_{max}$ ): 200 kN
- ❑ Fuerza mínima ( $F_{min}$ ): 100 kN
- ❑ Velocidad de carga del último ciclo ( $v$ ):  $5 \pm 1$  kN/min
- ❑ Velocidad de carga de los dos primeros ciclos ( $v^*$ ):  $15 \pm 1$  kN/min
- ❑ Velocidad de descarga ( $v_d$ ):  $50 \pm 5$  kN/min
- ❑ Desplazamiento de cada comparador ( $d_i$ )
- ❑ Media de los 4 desplazamientos  $d_i$  ( $d$ ):  $d = \frac{\sum_1^4 d_i}{4}$
- ❑ Rigidez vertical secante 100/200 (K)

#### 4.1.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

La rigidez se calcula en el tercer y último ciclo de carga como el cociente entre la variación de fuerza aplicada y la variación del desplazamiento entre las condiciones A y B (Figura 4.11), correspondientes a los valores de carga especificados para cada ensayo.

$$k = \frac{F_{max} - F_{min}}{d_A - d_B} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \right] \quad (4.1)$$

En los gráficos de las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se muestran la evolución de la carga aplicada sobre la placa de asiento frente al desplazamiento  $d$  en un ensayo de rigidez vertical a 80 kN, rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$  y rigidez vertical secante 100/200, respectivamente.

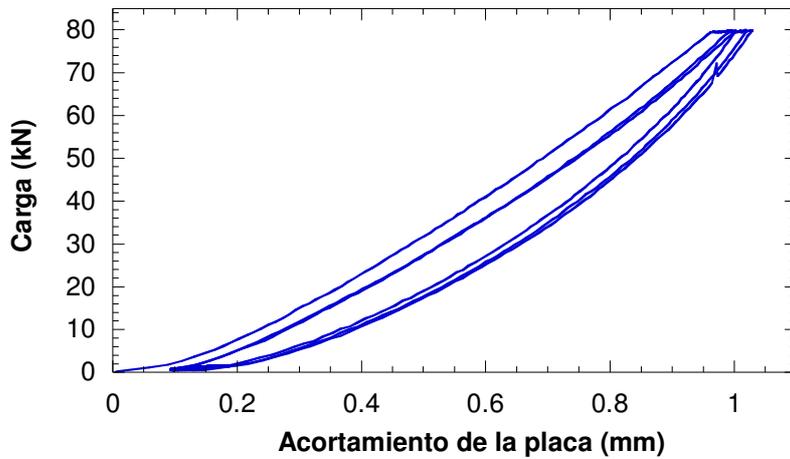


Figura 4.12. Gráfico F-d en un ensayo de rigidez vertical a 80 kN

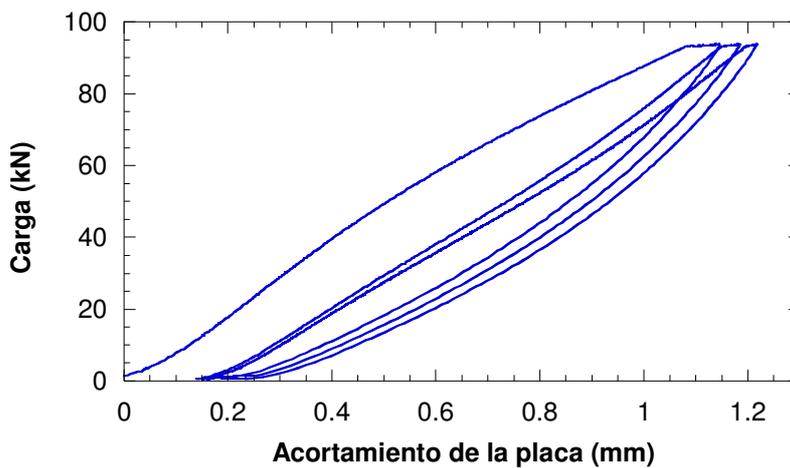


Figura 4.13. Gráfico F-d en un ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$

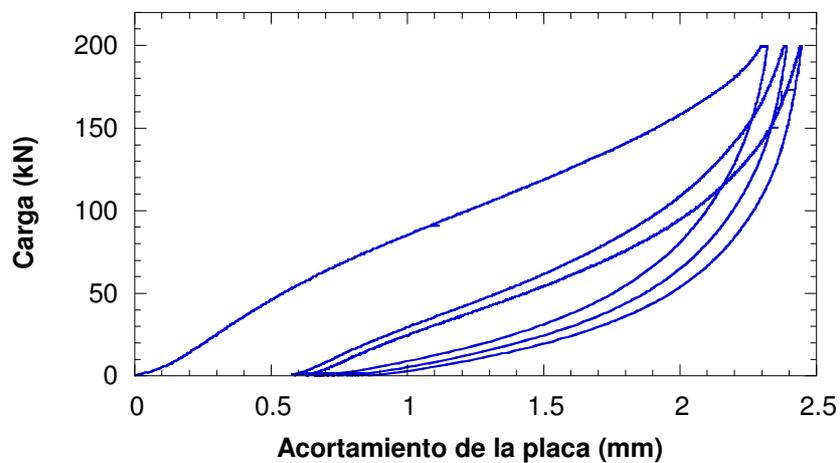


Figura 4.14. Gráfico F-d en un ensayo de rigidez vertical secante 100/200

La especificación marca los siguientes límites para los resultados obtenidos en los distintos ensayos:

- ❑ Rigidez vertical a 80 kN:  $k \leq 150$  kN/mm.
- ❑ Rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$ :  $80 \leq k_s \leq 125$  kN/mm.
- ❑ Rigidez vertical secante 100/200:  $K \leq 300$  kN/mm.

## **4.2 RIGIDEZ DINÁMICA A BAJA FRECUENCIA**

### **4.2.1 Justificación del ensayo**

Dada la naturaleza polimérica del material que conforma la placa de asiento, además de su comportamiento ante cargas estáticas, se hace preciso analizar su respuesta frente a esfuerzos dinámicos, que son los mayoritariamente presentes en su funcionalidad real.

### **4.2.2 Metodología**

#### *4.2.2.1 Descripción del ensayo según norma*

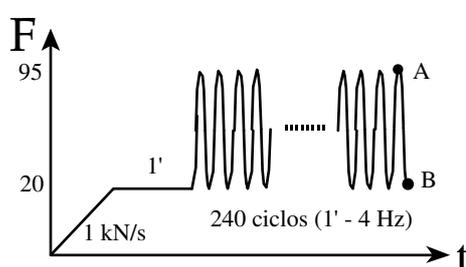
La placa de asiento se coloca entre dos soportes planos y rígidos, intercalando entre las superficies de contacto un tejido abrasivo con su parte activa actuando sobre las dos caras de la placa a caracterizar.

Sobre el conjunto y centrada se aplica una fuerza de compresión estática de 20 kN mantenida durante 1 minuto, para seguidamente, someterlo a una fuerza cíclica entre 20 y 95 kN a una frecuencia entre 3 y 5 Hz. Al cabo de 1 minuto, se determinan las deformaciones máxima y mínima ocasionadas, por medio de unos comparadores, de seguimiento dinámico del desplazamiento, que miden la variación de la separación entre los dos soportes rígidos.

#### *4.2.2.2 Metodología experimental adoptada*

Con el fin de poder comparar los valores de rigidez dinámica con los estáticos se empleó el mismo dispositivo de ensayo descrito en 4.1.2.2.

Sobre una placa de asiento nueva y con la misma disposición utilizada en los ensayos de rigidez estática (evitando, por tanto, la interposición del tejido abrasivo), se aplica una carga de 20 kN mantenida durante 1 minuto. Transcurrido este tiempo, se somete al conjunto a ciclos de carga senoidal entre 20 y 95 kN a una frecuencia de 4 Hz durante 1 minuto, para un total de 240 ciclos. La secuencia de esfuerzos aplicados, se indica en el esquema de la Figura 4.15 donde se representan las velocidades de carga, los tiempos de espera, el número de ciclos y los valores límites de carga aplicados en el ensayo dinámico.



**Figura 4.15.** *Secuencia de cargas en el ensayo de rigidez dinámica*

Para comprobar la influencia que el empleo del tejido abrasivo pudiera tener sobre el valor de la rigidez dinámica a baja frecuencia, se realizaron ensayos comparativos empleando los dos métodos, obteniéndose diferencias inferiores al 5 % y, siendo superiores los resultados logrados empleando el tejido abrasivo.

#### 4.2.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 100 kN que pueda adaptarse a la velocidad de carga especificada y cuatro captadores de desplazamientos LVDT dinámicos con un rango mínimo de 5 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. El dispositivo de ensayos estará formado por un cupón de carril con la parte inferior del patín rectificadas, con la posibilidad de adaptar una rótula en su parte superior para asegurar que la fuerza ejercida sobre el carril es perfectamente vertical y por un cupón de traviesa con la parte inferior rectificadas, de modo que las dos caras, la de apoyo de la placa de asiento y la de apoyo del cupón con la máquina de ensayo, sean paralelas entre sí. Por último, se precisa de un equipo informático

que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento con una frecuencia de muestreo superior a 50 Hz.

#### 4.2.2.4 Parámetros de ensayo

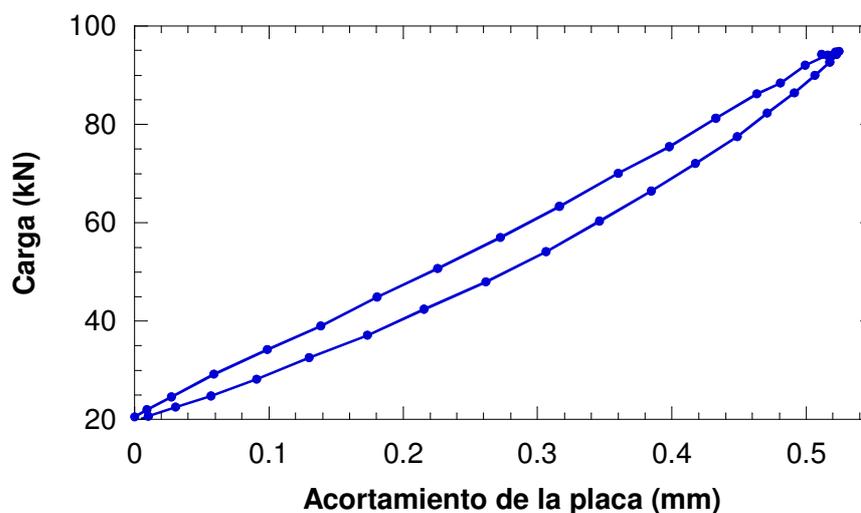
- ❑ Fuerza máxima ( $F_{\max}$ ): 95 kN
- ❑ Fuerza mínima ( $F_{\min}$ ): 20 kN
- ❑ Frecuencia de aplicación de las cargas ( $f$ ): 4 Hz
- ❑ Duración de la prueba ( $t$ ): 1 minuto (240 ciclos)
- ❑ Desplazamiento de cada comparador ( $d_i$ )
- ❑ Media de los 4 desplazamientos  $d_i$  ( $d$ ):  $d = \frac{\sum_1^4 d_i}{n}$
- ❑ Rigidez dinámica a baja frecuencia ( $k_d$ )

#### 4.2.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

La rigidez dinámica a baja frecuencia se calcula en el último ciclo de carga como el cociente entre la variación de la fuerza aplicada y la variación del desplazamiento entre los puntos A y B, correspondientes a los valores de carga de 95 y 20 kN, respectivamente. Por tanto, el valor de la rigidez dinámica a baja frecuencia se expresa como:

$$k_d = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} = \frac{75}{d_A - d_B} \left[ \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \right] \quad (4.2)$$

En el gráfico de la Figura 4.16 se muestra la evolución de la carga aplicada sobre la placa de asiento frente al desplazamiento  $d$  en el último ciclo del ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia.



**Figura 4.16.** Gráfico *F-d* del último ciclo para la determinación de la rigidez dinámica a baja frecuencia

La especificación mínima para la rigidez dinámica a baja frecuencia es la rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  y la máxima el doble de ésta última ( $k_s \leq k_d \leq 2 \cdot k_s$ ).

### 4.3 ATENUACIÓN DE IMPACTOS

#### 4.3.1 Justificación del ensayo

El elemento de apoyo debe repartir la presión carril/traviesa y escalar los esfuerzos verticales para una mejor conservación de la nivelación de la vía.

El ensayo de atenuación de impactos sirve para la comprobación de la aptitud del elemento de apoyo del carril frente a sollicitaciones de impacto.

Estas cargas de impacto son causadas por las imperfecciones de las superficies de las ruedas y los carriles, combinadas con las irregularidades del sistema de apoyo de la superestructura, losas o balasto. Dichas cargas se ven incrementadas a medida que aumentan las velocidades de circulación. El diseño y los materiales constitutivos de los elementos de apoyo de carril deben procurar aislar o atenuar el incremento de cargas.

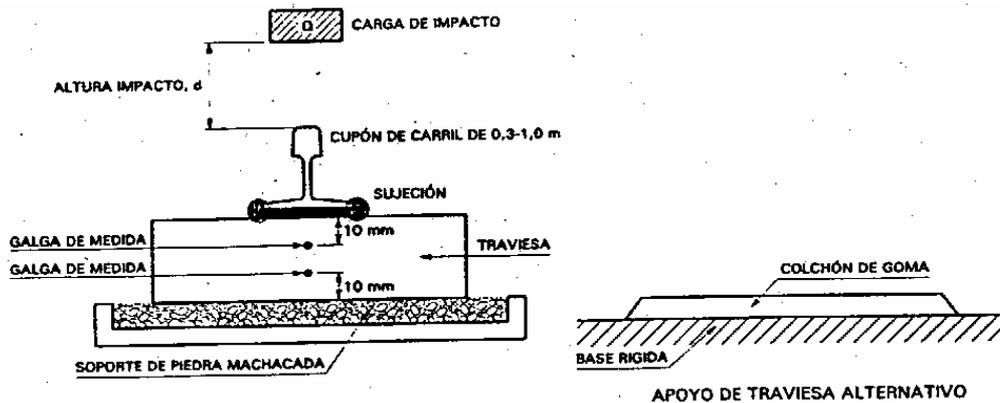
### 4.3.2 Metodología

#### 4.3.2.1 Descripción del ensayo según norma

El ensayo se realiza sobre componentes nuevos. Se miden las deformaciones sobre la traviesa debidas al impacto sobre la cabeza de un cupón de carril por caída libre de un determinado peso desde una determinada altura.

La medición de las deformaciones inducidas en la traviesa por el impacto, se realiza por medio de dos galgas extensométricas adheridas paralelas a la base de la misma, a 10 mm bajo el eje de la parte superior del elemento de apoyo y a 10 mm sobre la base de la traviesa en la misma vertical sobre el eje del carril.

El cupón de carril se debe fijar con el sistema de sujeción a ensayar sobre una traviesa dispuesta, a su vez, sobre una bancada de balasto, aunque alternativamente podrá ser de caucho como se indica en la Figura 4.17.



**Figura 4.17.** Configuración del ensayo de atenuación de impactos [7]

La atenuación de impactos de un determinado diseño y material de placa de asiento se mide a través del porcentaje de reducción de las deformaciones de la traviesa en relación con el valor obtenido del mismo ensayo con un elemento de apoyo o placa de asiento estándar, de copolímero de etileno y acetato de vinilo

(EVA) o de polietileno de alta densidad y alto peso molecular (HDPE), de 5 mm de espesor y lisa, con una rigidez no inferior a 500 kN/mm. Si el sistema de sujeción va a trabajar con una placa de espesor mayor que los 5 mm de la placa estándar, será necesario suplementar ésta sobre el mismo sistema de sujeción con una lámina de aluminio de espesor necesario hasta conseguir la altura total de la placa en estudio. El peso, material impactante y altura del ensayo están limitados a que se produzca una carga de impacto  $Q$ , comprobándose, con la placa estándar de referencia, que la deformación no sea superior al 80% de la nominal de fisuración de la traviesa en los puntos instrumentados.

El ensayo se repite tres veces, tanto para la placa de referencia como para la placa a ensayar.

#### 4.3.2.2 Metodología experimental adoptada

Ante la poca reproducibilidad de los resultados y falta de precisión en las medidas empleando el método desarrollado en la especificación, se opta por desarrollar un nuevo procedimiento, con la misma filosofía de ensayo, pero ayudándose de equipos que puedan aportar resultados más coherentes y precisos.

La modificación básica consiste en la sustitución de la configuración de ensayo propuesto en la especificación, por otra en la que el impacto se genera por medio de una máquina de ensayo.

Para llevar a cabo el ensayo se monta un cupón de carril y el conjunto de sujeción sobre una traviesa completa, la cual se apoya sobre la bancada de la máquina, intercalando, previamente, una lámina de caucho de 10 mm de espesor.

En la Figura 4.18 se aprecia una vista general del dispositivo de ensayo empleado para realizar el ensayo de atenuación de impactos sobre la placa de asiento. En dicha figura se puede observar el dispositivo de bola que asegura

que la carga de impacto se transmite siempre en el mismo lugar geométrico del carril y, por lo tanto, en la traviesa, garantizando, de esta forma, que los resultados obtenidos con la placa de referencia y la placa de prueba son comparativos. También se puede observar, en la misma figura, la ubicación de un reloj comparador, soldado al carril para fijar la altura desde la que impacta el actuador de la máquina dinámica sobre el conjunto a ensayar.



**Figura 4.18.** *Dispositivo empleado para la realización del ensayo de atenuación de impactos*

A través del pistón hidráulico de la máquina de ensayos se genera un impacto, consistente en la aplicación de una onda cuadrada en control de posición desde una altura determinada con respecto del carril, produciendo una carga elevada sobre la traviesa similar a la establecida por la especificación (en torno a 100 kN). En estas condiciones, se registran las deformaciones sufridas en la traviesa como consecuencia de la aplicación de la carga dinámica, conseguida como ya se ha mencionado con una onda de naturaleza cuadrada.

Las mediciones se realizan por medio de dos bandas extensométricas pegadas sobre la traviesa y centradas respecto al eje cupón de carril. Las galgas se colocaron a 10 mm del borde superior e inferior de la traviesa, respectivamente.

En la Figura 4.19 se observa un detalle de la colocación de las bandas extensométricas empleadas para registrar las deformaciones producidas en las traviesas.



**Figura 4.19.** *Detalle de la colocación de las galgas extensométricas*

#### 4.3.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 100 kN en compresión con posibilidad de aplicar un impacto en forma de onda cuadrada y un captador de desplazamientos LVDT con un rango mínimo de 5 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. La medida de las deformaciones en la traviesa se realiza por medio de dos galgas extensométricas de 100 a 120 mm de longitud y equipo adecuado que permita efectuar una lectura de las mismas. Se empleará un cupón de carril con la parte inferior del patín rectificada y con la posibilidad de adaptar una rótula en su parte

superior para asegurar que el impacto ejercido sobre el carril es perfectamente vertical. Entre la bancada de la máquina de ensayo y la traviesa se colocará una plancha de caucho de 10 mm de espesor aproximadamente. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento con una frecuencia de muestreo superior a 1000 kHz.

#### 4.3.2.4 Parámetros de ensayo

- ❑ Carga de impacto (Q): 100 kN
- ❑  $\varepsilon_s^i$ : Máxima deformación en la zona superior de la traviesa en cada ensayo i.
- ❑  $\varepsilon_s^r$ : Media de las máximas deformaciones en la zona superior de la traviesa con el elemento de apoyo de referencia (estandar) en tres ensayos
- ❑  $a_s^i$ : Atenuación en la zona superior de la traviesa en cada ensayo i.

$$a_s^i = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_s^i}{\varepsilon_s^r} \right) \quad (4.3)$$

- ❑  $\varepsilon_i^i$ : Máxima deformación en la zona inferior de la traviesa en cada ensayo i.
- ❑  $\varepsilon_i^r$ : Media de las máximas deformaciones en la zona inferior de la traviesa con el elemento de apoyo de referencia (estandar) en tres ensayos
- ❑  $a_i^i$ : Atenuación en la zona inferior de la traviesa en cada ensayo i.

$$a_i^i = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_i^i}{\varepsilon_i^r} \right) \quad (4.4)$$

- ❑  $a_i$ : atenuación por ensayo.

$$a_i = \frac{a_s^i + a_i^i}{2} \quad (4.5)$$

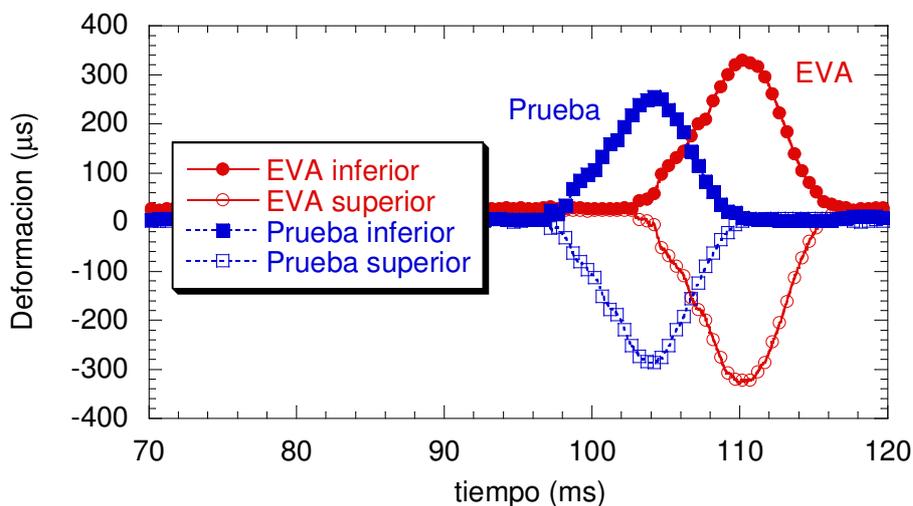
- ❑ a: atenuación media.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^3 a_i}{3} \quad (4.6)$$

### 4.3.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

El resultado del ensayo se obtiene comparando los valores de deformación determinados en la travesía para el conjunto de sujeción que contempla la instalación de la placa de asiento de EVA (suplementada si el espesor de la que es objeto de análisis es superior a 5 mm), con los obtenidos cuando se realiza el montaje de la sujeción con la placa de asiento a caracterizar.

En la Figura 4.20 se puede apreciar la mayor atenuación generada por una placa de 7 mm respecto a la placa de EVA suplementada.



**Figura 4.20.** Comparativa de los resultados obtenidos para la placa de EVA y la placa de prueba

Se calculan los valores de atenuación para cada ensayo como la media de la atenuación de la galga superior y la galga inferior. Obtenidos los valores de atenuación de cada ensayo se determina la atenuación total como media de cinco ensayos.

La especificación técnica para la atenuación de impacto requiere un valor mínimo del 25 % ( $a \geq 25\%$ , atenuación alta)

## 5 ENSAYOS SOBRE EL CONJUNTO DE LA SUJECIÓN

### 5.1 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO LONGITUDINAL

#### 5.1.1 Justificación del ensayo

La sujeción debe proporcionar un esfuerzo de retención longitudinal superior al de las traviesas por el balasto y conservar este esfuerzo a pesar del uso, desgaste, fatiga y vibraciones del carril al paso de las circulaciones.

Asimismo, la fijación debe impedir que el carril se desplace en sentido longitudinal, por incrementos de temperatura, debe controlar el deslizamiento y la separación de las posibles calas que puedan aparecer en el carril, en caso de rotura de éste y no debe sufrir traslaciones o rotación inducidas por el carril si éste tiende a deslizar.

#### 5.1.2 Metodología

##### 5.1.2.1 Descripción del ensayo según norma

Se aplica una carga longitudinal de tracción sobre uno de los extremos de un carril, que se encuentra sujeto a través del sistema de sujeción a ensayar a una traviesa anclada en una bancada de ensayo, según puede observarse en la configuración de ensayo que se representa en la Figura 4.21

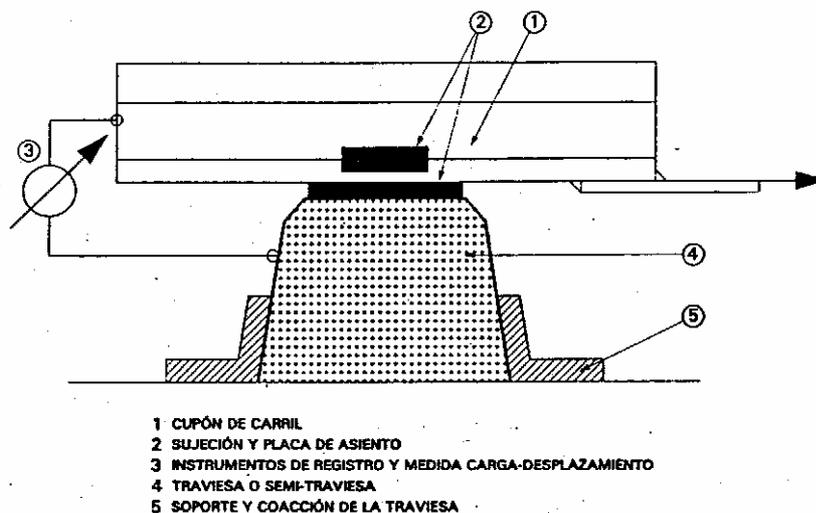


Figura 4.21. Configuración del ensayo de resistencia longitudinal [7]

Dicho esfuerzo de tracción se aumenta progresivamente hasta el momento en que el carril desliza. La máxima carga que se puede aplicar sin que exista movimiento relativo entre carril y traviesa, se determina a partir de la curva de la carga frente al desplazamiento.

Operativamente la carga de tracción se aplica en escalones de carga ( $\Delta F_i$ ), que se mantienen durante dos minutos. Desde el comienzo se miden los desplazamientos relativos entre carril y traviesa frente a los incrementos de carga. Una vez el carril comience a deslizar, se retira la carga y se continúa midiendo el desplazamiento longitudinal durante 2 minutos más.

Este ciclo de carga y descarga se realiza cuatro veces con un período de descanso de 10 minutos entre ciclo y ciclo, sin reajustar, en ningún momento, el sistema. En cada ensayo se efectúa la gráfica de la carga aplicada frente al desplazamiento.

#### *5.1.2.2 Metodología experimental adoptada*

El ensayo consiste en registrar el máximo desplazamiento longitudinal efectuado por el carril ( $D_{\max}^i$ ) tras aplicar una carga de tracción escalonada en incrementos de 2.5 kN ( $\Delta F_i$ ), mantenidos durante 2 minutos cada uno de ellos, hasta que se produce el deslizamiento longitudinal del carril respecto a la traviesa. El deslizamiento remanente ( $D_{\text{res}}^i$ ), se mide transcurridos dos minutos, desde la descarga.

Este ciclo de carga y descarga se realiza cuatro veces con un período de descanso de 10 minutos entre cada ensayo, sin reajustar en ningún momento los componentes del sistema de sujeción.

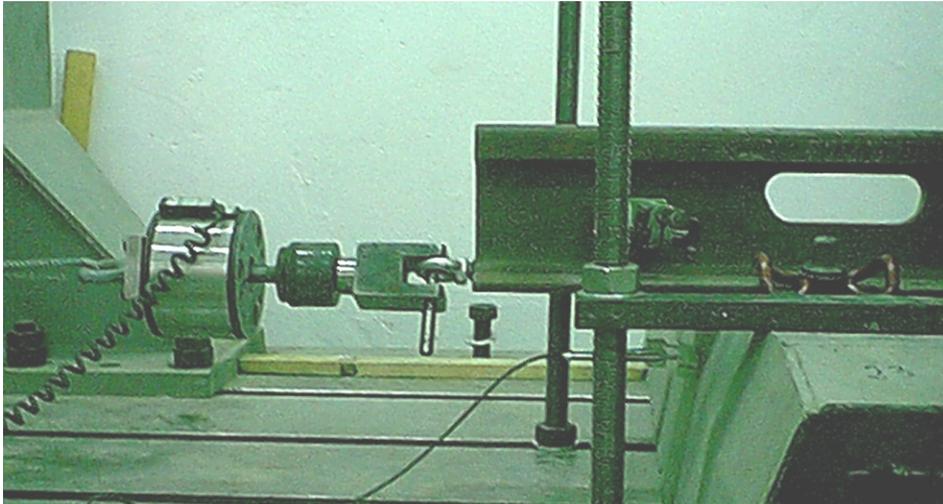
En la Figura 4.22 se observa el dispositivo de ensayo empleado para determinar la resistencia al deslizamiento longitudinal del carril siguiendo las recomendaciones de la especificación técnica.



**Figura 4.22.** *Dispositivo empleado para la realización del ensayo de resistencia longitudinal*

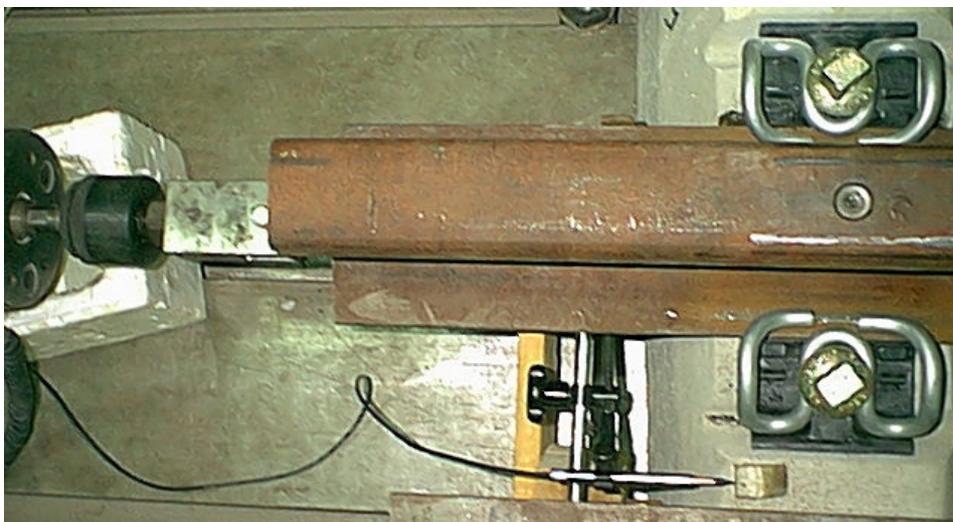
El dispositivo consta de un cable flexible que se une a la máquina de ensayo por medio de una rótula. El otro extremo del cable se conecta al carril después de pasar por una polea que servirá para convertir el esfuerzo vertical de la máquina de ensayo en un esfuerzo horizontal y longitudinal sobre el carril.

Para la medida de la carga real que se transmite sobre el carril sin tener en cuenta, por efecto del rozamiento, las pérdidas que puedan tener lugar en la polea, se interpone una célula de carga entre el carril y ésta, como puede verse en el detalle de la Figura 4.23.



**Figura 4.23.** Colocación de la célula de carga auxiliar

Para la medición del deslizamiento longitudinal del carril respecto a la traviesa, se coloca un comparador LVDT solidario con el carril y apoyado en la traviesa (Figura 4.24)



**Figura 4.24.** Medición del deslizamiento longitudinal

### 5.1.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 100 kN en tracción, una célula de carga independiente con una capacidad mínima de 25 kN y un captador de desplazamiento LVDT con un

rango mínimo de 10 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. El dispositivo de ensayos constará de una polea capaz de transformar el esfuerzo en sentido vertical que realiza la máquina de ensayo en otro horizontal que produzca un esfuerzo longitudinal sobre el carril. El cupón de carril empleado estará provisto de un punto de anclaje en uno de sus extremos para poder tirar de él longitudinalmente. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento.

#### 5.1.2.4 Parámetros de ensayo

- Escalones de carga ( $\Delta F_i$ ):  $2,5 \pm 0,3$  kN
- Duración de cada escalón (t): 2 minutos
- Desplazamiento máximo longitudinal ( $D_{\max}^i$ )
- Desplazamiento residual, tras la aplicación de la carga ( $D_{\text{res}}^i$ )
- Desplazamiento longitudinal elástico, previo al deslizamiento ( $D_e^i$ )
- Máxima carga longitudinal del carril necesaria para iniciar el deslizamiento o desplazamiento inelástico ( $F_i$ )

#### 5.1.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

Obtenidos, para cada ensayo, los valores de desplazamiento máximo y residual, se calcula el valor del desplazamiento elástico por medio de la siguiente expresión:

$$D_e^i = D_{\max}^i - D_{\text{res}}^i \quad (4.7)$$

Si el valor de desplazamiento elástico medido ( $D_e^i$ ) es inferior a 0.5 mm, se considerará que  $D_e^i = 0.5$  mm.

El diagrama carga-desplazamiento tipo obtenido en el ensayo es como el que se muestra en el gráfico de la Figura 4.25. Sobre dicho diagrama, la  $F^i$  se define como la fuerza correspondiente a un desplazamiento  $D_e^i$ . Para calcular el valor de la resistencia al deslizamiento longitudinal, se desprecia el primero de los cuatro ensayos realizados y a partir de los otros tres se tendrá que:

$$F = \frac{\sum i}{\dots} \quad (4.8)$$

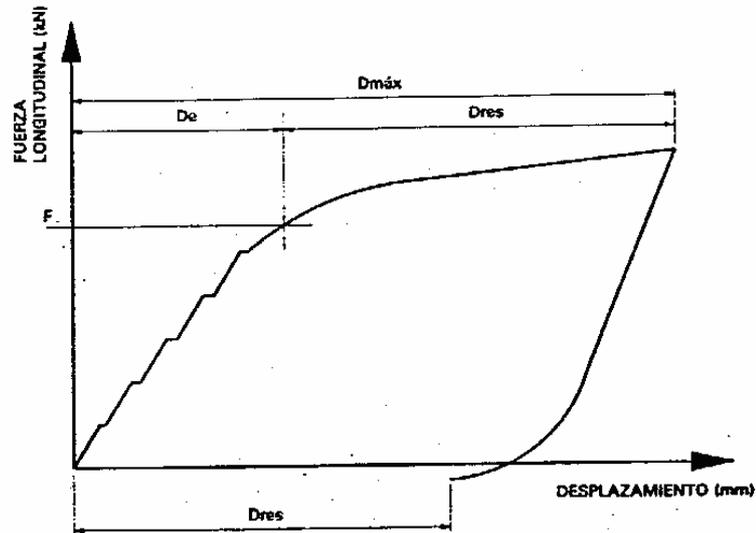


Figura 4.25. Diagrama F-D en un ensayo de resistencia longitudinal [7]

En el gráfico de la Figura 4.26 se muestra la evolución de la carga aplicada sobre el carril frente al desplazamiento longitudinal del mismo para un caso concreto, en el que el desplazamiento elástico es inferior a 0.5 mm.

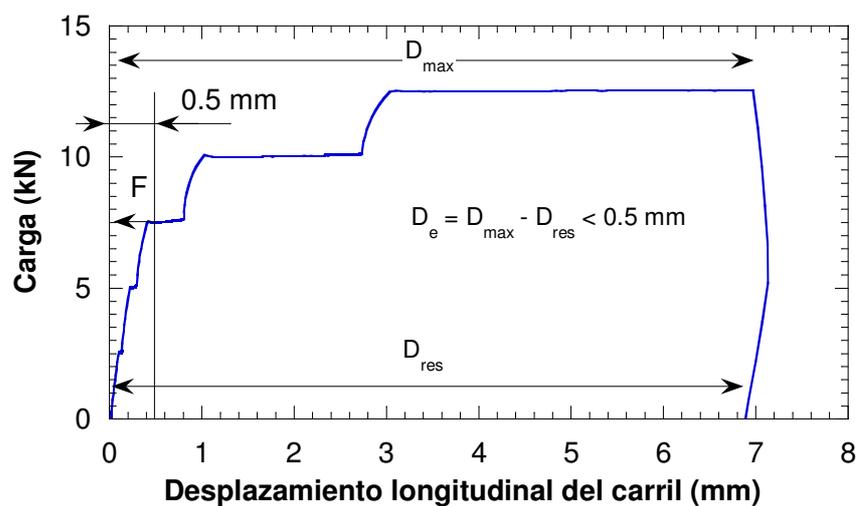


Figura 4.26. Gráfico F-D en un ensayo real de resistencia al desliz. longitudinal

La especificación recoge que la resistencia al deslizamiento longitudinal mínima es de 9 kN. ( $F \geq 9$  kN).

## 5.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TORSIÓN

### 5.2.1 Justificación del ensayo

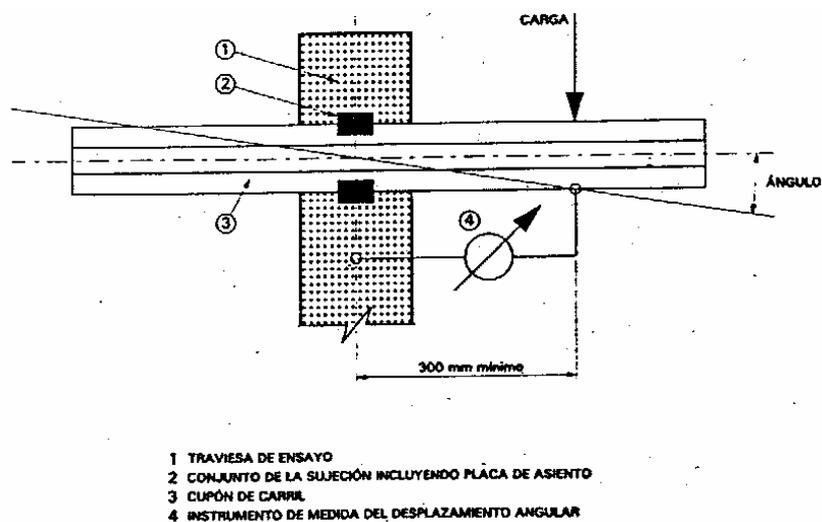
La resistencia a la torsión está relacionada con la resistencia al pandeo de la vía. Es una condición necesaria para asegurar la estabilidad de la vía a altas temperaturas.

No se debe permitir el giro del carril por acción de los esfuerzos horizontales sobre la cabeza del carril como consecuencia del movimiento de lazo.

### 5.2.2 Metodología

#### 5.2.2.1 Descripción del ensayo según norma

La configuración empleada para la realización del ensayo de resistencia a la torsión es la que se muestra en la Figura 4.27.



**Figura 4.27.** Configuración empleada para la realización del ensayo de resistencia a la torsión [7]

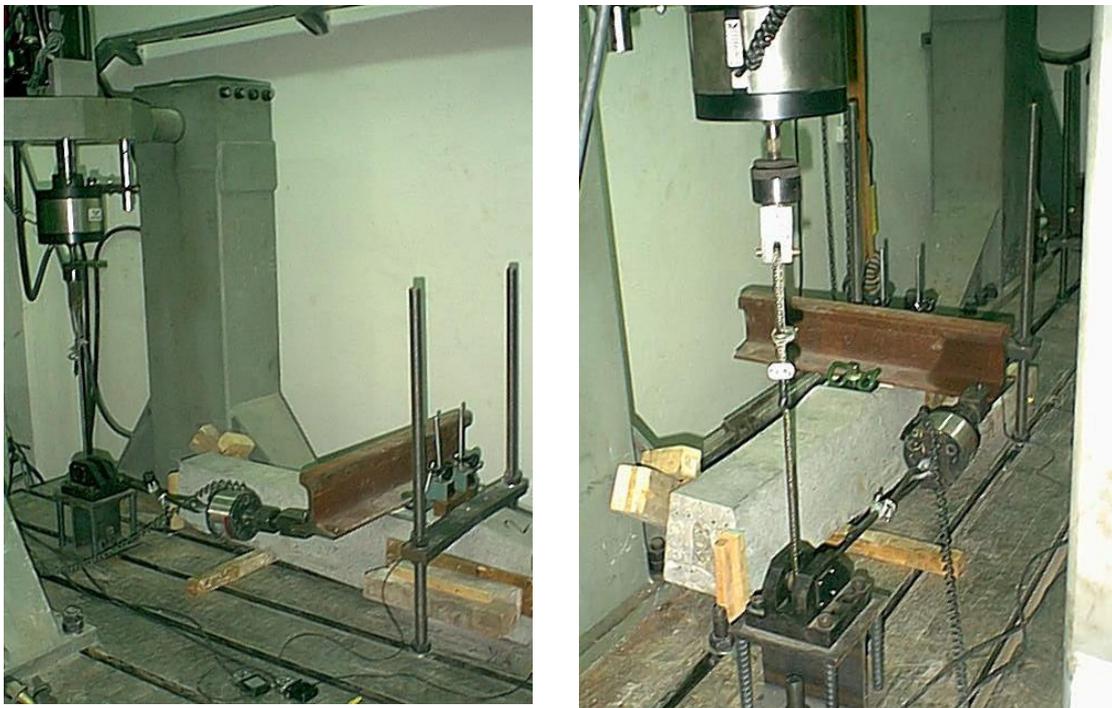
Se aplica una carga transversal al patín del carril sujeto, a su vez, a una traviesa por el sistema de sujeción a ensayar. La distancia de aplicación de la carga respecto al eje de la traviesa será superior a 300 mm. Se registra el giro del carril respecto a la traviesa a medida que la carga va aumentando con una velocidad de carga  $v$ , hasta que el carril ha rotado  $1.5^\circ$ , momento en el que se

descarga el sistema. El momento que causa la rotación de 1º se determina así a partir de la curva que representa la carga frente al desplazamiento angular.

El ensayo se repite tres veces con un intervalo de 10 minutos entre cada ensayo, no debiéndose ajustar en ningún momento la disposición del sistema de sujeción.

#### 5.2.2.2 Metodología experimental adoptada

Para realizar el ensayo de torsión se monta sobre una traviesa un conjunto de sujeción con elementos nuevos con el par nominal del ensayo. En la Figura 4.28 se presenta la disposición de ensayo adoptada para determinar la resistencia a la torsión del conjunto de la sujeción. Se puede apreciar, en la misma imagen, el sistema de polea empleado para reproducir el esfuerzo de tiro en la dirección transversal al patín del cupón de carril empleado. El brazo de tiro fue superior a 300 mm.



**Figura 4.28.** *Dispositivo empleado para la realización del ensayo de resistencia a torsión*

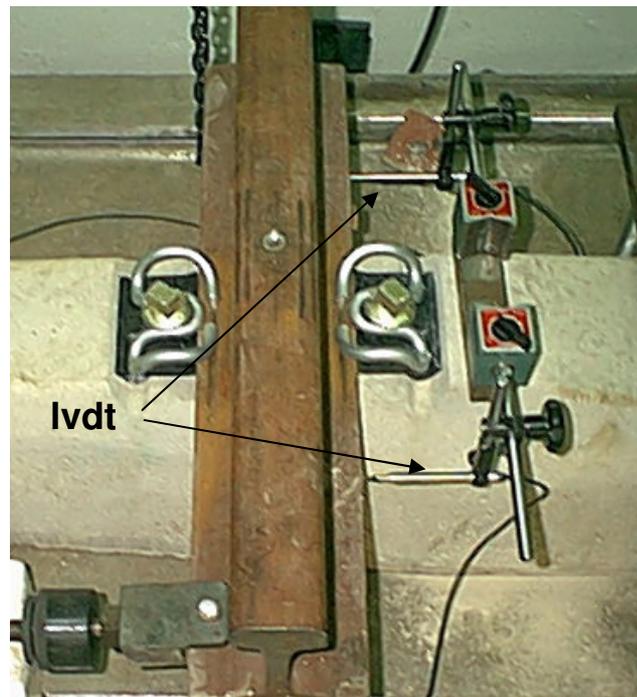
En el dispositivo se intercala una célula de carga para no registrar la fuerza absorbida por el rozamiento de los elementos y utillajes intermedios utilizados para realizar el ensayo (Figura 4.29).



**Figura 4.29.** *Colocación de la célula de carga auxiliar*

A lo largo del ensayo se registra la carga aplicada y el correspondiente ángulo girado por el carril por medio de la lectura de dos comparadores LVDT, separados una distancia conocida. En la Figura 4.30 se puede apreciar la disposición de los comparadores LVDT, empleados para la determinación del ángulo de giro del eje del carril, así como de la célula de carga. La carga se retira cuando el ángulo girado alcanza el valor de  $1.5^\circ$ . A partir del diagrama que representa el momento aplicado en función del ángulo girado, se determina el momento necesario para obtener un giro de  $1^\circ$ .

La prueba se repite tres veces con un intervalo de 10 minutos entre cada ensayo, sin reajustar la disposición de los diferentes elementos del sistema de sujeción.



**Figura 4.30.** Colocación de los comparadores para la determinación del ángulo de giro

#### 5.2.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 50 kN en tracción que pueda adaptarse a la velocidad de carga especificada, una célula de carga independiente con una capacidad mínima de 25 kN y dos captadores de desplazamientos LVDT con un rango mínimo de 10 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. El dispositivo de ensayos constará de una polea capaz de transformar el esfuerzo en sentido vertical que realiza la máquina de ensayo en otro horizontal que produzca un esfuerzo perpendicular sobre el carril. El cupón de carril empleado estará provisto de un punto de anclaje en uno de sus extremos para poder tirar de él perpendicularmente. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro continuo de la curva carga/desplazamiento.

#### 5.2.2.4 Parámetros de ensayo

- Distancia entre comparadores ( $d_1$ )

- ❑ Distancia mínima de aplicación de la carga (d): 300 mm
- ❑ Velocidad de carga (v): 10±1 kN/mm
- ❑ Carga perpendicular al eje del carril (Q)
- ❑ Giro del carril ( $\alpha$ )
- ❑ Momento necesario para rotar el carril 1º con relación a un plano paralelo a la base de la traviesa, calculado a partir de la carga ( $M_i$ )

### 5.2.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación

El momento aplicado sobre el carril se obtiene a partir de la expresión:

$$M_i = Q \cdot d \quad (4.11)$$

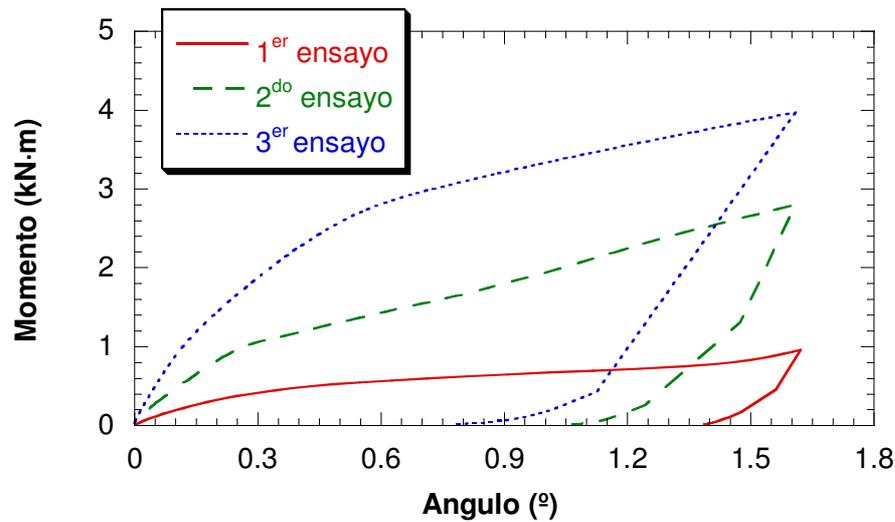
Mientras que el ángulo girado por el carril se puede calcular en función del desplazamiento medido por los comparadores ( $\Delta L_1$  y  $\Delta L_2$ ), así como de la distancia que existe entre ellos ( $d_1$ ):

$$\alpha = \arctg \frac{|\Delta L_1| + |\Delta L_2|}{d_1} \quad (4.10)$$

La resistencia a torsión en cada uno de los ensayos ( $M^i$ ) es el valor del momento aplicado sobre el carril para girarlo 1º. La Resistencia a Torsión se obtiene como la media aritmética de los valores obtenidos en los tres ensayos de que se compone la prueba.

$$M = \frac{\sum M^i}{3} \quad (4.11)$$

En el gráfico de la Figura 4.31 se muestra la evolución del momento aplicado sobre el carril frente al ángulo girado por el carril respecto al eje de la traviesa para los tres ensayos realizados sobre una sujeción. En la figura se puede observar como es el primer ensayo el que ofrece menor resistencia al giro, aumentando la misma a medida que se acopla la sujeción.



**Figura 4.31.** Evolución del momento respecto al ángulo girado por el carril

La especificación técnica da para la media de los tres ensayos una resistencia mínima a la torsión de 0.75 kN·m ( $M \geq 0.75 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ).

### 5.3 ENSAYO DINÁMICO DE CARGA INCLINADA

#### 5.3.1 Justificación del ensayo

Es importante determinar el comportamiento a largo plazo de los sistemas de sujeción directa de carril sobre traviesa, mediante la aplicación de ciclos repetitivos de carga representativos de los producidos en vía.

Para simular fidedignamente los esfuerzos reales ocasionados por la circulación del ferrocarril, hay que tener en cuenta que los más agresivos se producen tanto en tramos rectos, por el denominado efecto látigo debido al zigzagado del convoy, como en las zonas curvas debido a la fuerza centrífuga.

Los impactos generados presentan una dirección inclinada respecto a la vertical con una intensidad y ángulo de ataque que dependen entre otros parámetros del radio de las curvas del trazado (en el caso de la alta velocidad son superiores a 1000 m) y de la rigidez de la placa de asiento.

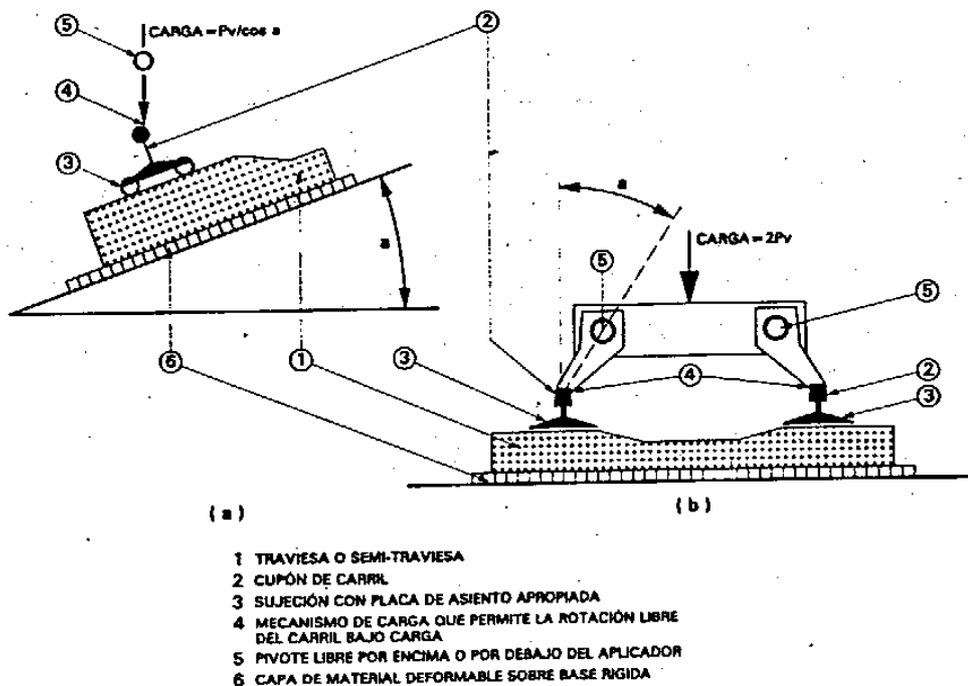
Por todo ello, la fijación debe soportar los esfuerzos de arranque sin ruptura o fluencia, evitar un sobreancho excesivo y oponerse al vuelco excesivo del carril (riesgo de descarrilamiento y de desgaste rueda/carril), además de poseer una resistencia a fatiga a largo plazo adecuada.

Con el ensayo dinámico de carga inclinada se evalúa la aptitud del conjunto de sujeción sometida a una fatiga prolongada en el tiempo provocada por el efecto de cargas repetidas que simulan el paso de las ruedas del ferrocarril.

### 5.3.2 Metodología

#### 5.3.2.1 Descripción del ensayo según norma

La especificación propone dos configuraciones diferentes para la realización del ensayo dinámico de carga inclinada como se muestra en la Figura 4.32.



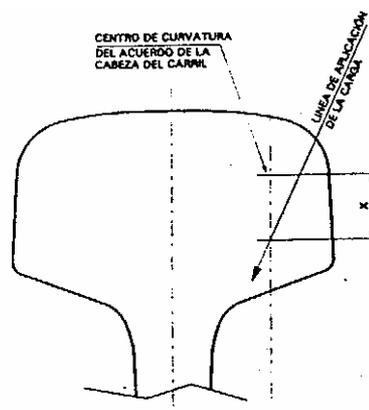
**Figura 4.32.** Configuración para el ensayo dinámico de carga inclinada [7]

La configuración (a) consiste en aplicar una carga vertical sobre una traviesa que se inclina el ángulo adecuado, mientras que, la configuración (b) consiste en aplicar el doble de carga vertical y, por medio de un útil repartidor específico, distribuir la fuerza sobre los dos carriles de la traviesa con el ángulo fijado.

La traviesa se sitúa sobre un soporte rígido con un apoyo intermedio de un material que pueda adaptarse a la falta de planitud de la suela de la misma, como por ejemplo el contrachapado.

Una vez dispuesto el conjunto sobre la bancada, se realiza un proceso de carga y descarga hasta una carga máxima  $F_{max}$ , que dependerá de la configuración de ensayo, a una velocidad de carga  $v$ . Esta operación se repite un total de diez veces.

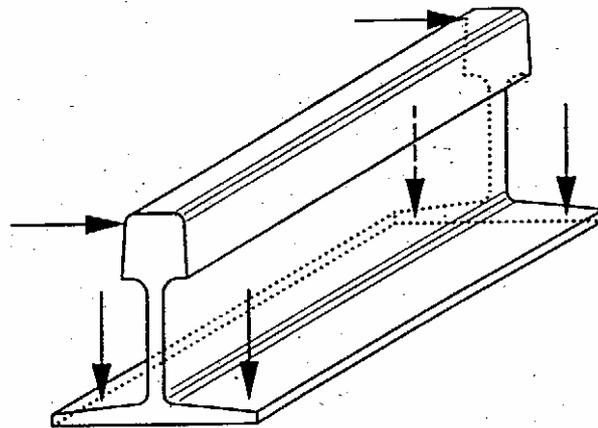
El proceso del ensayo consiste en reproducir una carga periódica, de amplitud constante, en una posición e inclinación determinados sobre la cabeza del carril durante tres millones de ciclos. El punto de aplicación de la carga se determina a partir de la Figura 4.33.



**Figura 4.33.** Punto de aplicación de la carga en el ensayo dinámico [7]

La magnitud de la carga y posicionamiento del aplicador se determinan a partir de la rigidez vertical dinámica secante y del radio de las curvas del trazado. La carga variará desde la máxima carga,  $F_{max}$ , hasta una mínima constante de 5 kN a una frecuencia entre 1 y 5 Hz.

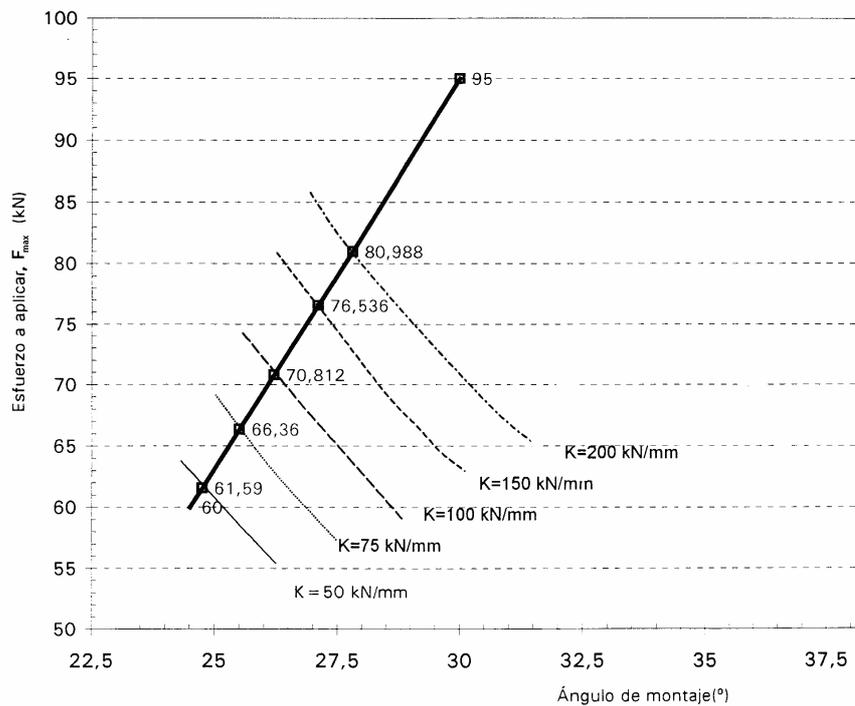
Antes de la aplicación de los ciclos de fatiga, y tras los 10 primeros ciclos de asentamiento, se miden los desplazamientos (d) indicados en la Figura 4.34, operación esta que se repite después de aplicar los tres millones de ciclos para poder determinar los desplazamientos residuales, tanto de la cabeza, como del patín del carril.



**Figura 4.34.** *Puntos de medida del desplazamiento en el ensayo dinámico [7]*

Asimismo, antes del ensayo dinámico deben obtenerse, mediante ensayos sobre las mismas componentes de sujeción y en este orden, su fuerza de apriete  $P_0$ , su resistencia al desplazamiento longitudinal del carril y sus rigideces verticales a 80 kN y secante  $P_0/P_0+75$ . Posteriormente, sobre el mismo conjunto, deberán determinarse, en este orden, sus rigideces, resistencia longitudinal al deslizamiento y fuerza de apriete.

El valor de la carga máxima de ensayo y del ángulo de aplicación de la carga para la configuración, se obtienen de la gráfica de la Figura 4.35 como las coordenadas del punto de trabajo resultante de la intersección de la curva correspondiente al valor de rigidez dinámica y la recta inclinada (valor aconsejado).



**Figura 4.35.** Valor máximo de carga ( $F_{max}$ ) y ángulo de aplicación ( $\alpha$ ) [7]

### 5.3.2.2 Metodología experimental propuesta

La primera diferencia con lo indicado en la especificación es la configuración del ensayo. Se opta por una disposición como la que se muestra en la Figura 4.36, en la que la traviesa se sitúa horizontal apoyada directamente sobre la bancada de ensayo y la carga inclinada se aplica por medio de un actuador que se ha girado el ángulo adecuado.

El ensayo consiste en reproducir una carga periódica de amplitud constante, durante tres millones de ciclos, en una posición e inclinación determinadas con respecto de la cabeza y de la base del cupón del carril, respectivamente. El utillaje empleado para la realización del ensayo dinámico es el que se muestra en la Figura 4.37. El aplicador, como puede verse, está formado por una placa con una muesca en forma de “v”, que se adapta perfectamente a la curvatura del carril, y por una placa de neopreno reforzada con láminas de acero que absorbe la componente del esfuerzo perpendicular a la línea de carga.

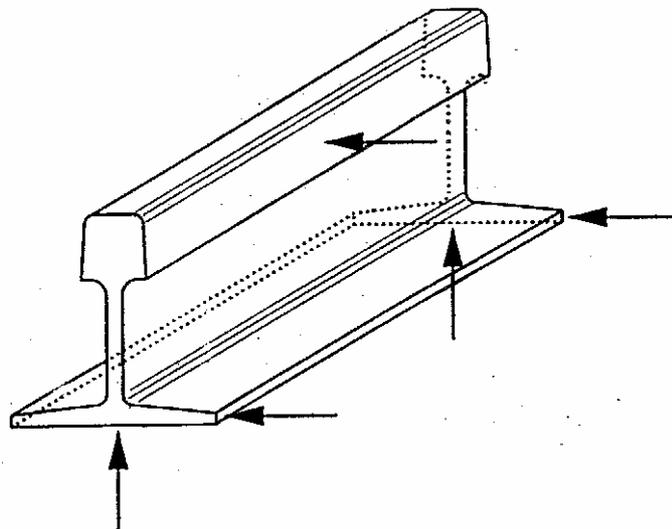


**Figura 4.36.** *Dispositivo empleado para el ensayo dinámico*



**Figura 4.37.** *Utillaje empleado para el ensayo dinámico*

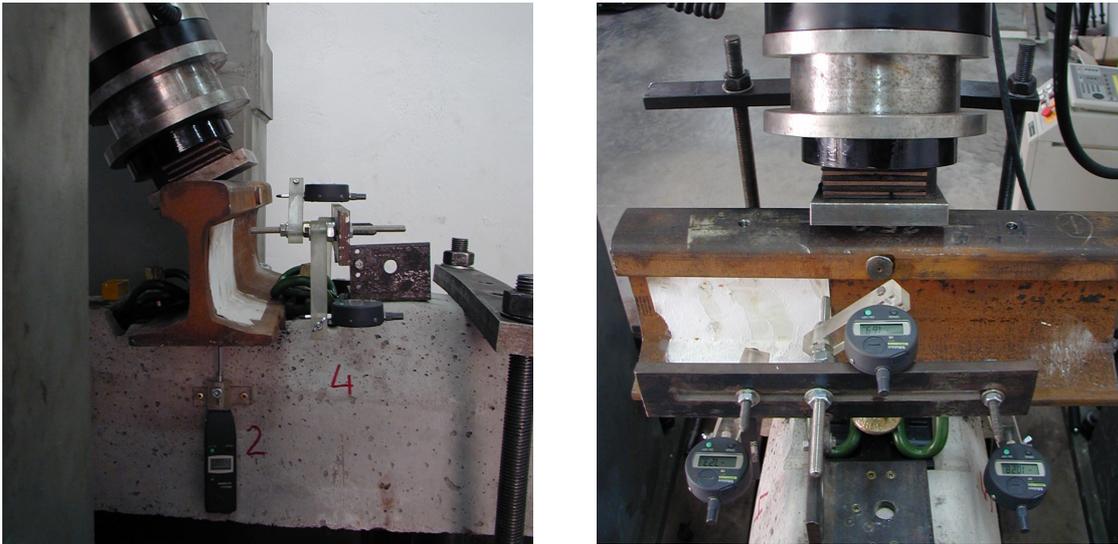
La otra variación introducida respecto a la especificación es la medida de las deformaciones residuales del sistema. Se considera necesaria la incorporación de una nueva medida, los desplazamientos horizontales relativos entre traviesa y patín del carril. Esta medida puede ser muy interesante desde el punto de vista de la conservación del ancho de vía. Debido a la gran cantidad de puntos de medida introducidos por la especificación, y al querer determinar otro desplazamiento más, se optó por la reducción de los prescritos, intentando no perder, por ello, información relativa al ensayo, para lo cual se han realizado las siguientes modificaciones, que pueden verse resumidas en la Figura 4.38:



**Figura 4.38.** *Puntos de medida propuestos*

- ❑ Los cuatro puntos previstos para la medición del desplazamiento vertical y situados en las cuatro esquinas del patín del carril, se sustituyen por dos puntos situados a ambos lados de la sujeción sobre el eje del carril.
- ❑ Los dos puntos empleados para la determinación del desplazamiento horizontal de la cabeza se sustituyen por un único punto situado en el eje de aplicación de la carga.
- ❑ Se añaden dos nuevos puntos a ambos lados de la sujeción para determinar el desplazamiento horizontal del patín.

La localización de los comparadores LVDT, dentro del dispositivo de ensayo, para la determinación de estos desplazamientos, puede apreciarse perfectamente en las vistas lateral y frontal mostradas en la Figura 4.39.



**Figura 4.39.** *Detalle de la localización de los puntos de medida propuestos*

La magnitud de la carga máxima y el posicionamiento del aplicador de esfuerzos se determinan a partir de la rigidez vertical dinámica secante de la placa de asiento del carril, empleando el gráfico de la Figura 4.35.

Los desplazamientos relativos del carril con respecto de la traviesa a medir son los que a continuación se citan:

- ❑ Desplazamiento horizontal de la cabeza ( $d^c$ )
- ❑ Desplazamiento horizontal del patín ( $d_i^{ph}$ )
- ❑ Desplazamiento vertical del patín ( $d_i^{pv}$ )

Previa y posteriormente a la realización de la prueba dinámica se ejecutan 10 ciclos entre los valores de carga máximo y mínimo establecidos, sobre el conjunto de la sujeción a una velocidad de de carga  $v$ . En los ciclos 9 y 10 se realizan las medidas de desplazamiento correspondientes a la carga mínima y a la carga máxima. A partir de los citados valores, se determinan los

desplazamientos residuales de la cabeza del carril,  $D^c$ , y la media de los desplazamientos residuales verticales y horizontales del patín del carril,  $D^{pv}$  y  $D^{ph}$ , respectivamente.

Finalizado el ensayo dinámico, sobre las mismas componentes de la sujeción, se repiten los ensayos de fuerza de apriete, resistencia al deslizamiento longitudinal y rigideces verticales a 80 kN y secante  $P_0/P_0+75$ , a fin de comprobar la influencia del ensayo dinámico sobre estas variables.

### 5.3.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo será necesaria una máquina de ensayo con una capacidad mínima de 100 kN en compresión con posibilidad de aplicación de carga inclinada con ángulo variable y cinco captadores de desplazamientos LVDT dinámicos con un rango mínimo de 10 mm de recorrido y resolución de 0.01 mm. El aplicador de carga permitirá ajustar la línea de carga a la indicada en la especificación. Por último, se precisa de un equipo informático que permita el registro de los datos obtenidos.

### 5.3.2.4 Parámetros de ensayo

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al ensayo dinámico (k)
- Rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$ , previo al ensayo dinámico ( $k_s$ )
- Fuerza de apriete, previa al ensayo ( $P_0$ )
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al ensayo (F)
- Coeficiente de mayoración dinámica de la rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  (c): 1.5.
- Rigidez vertical secante dinámica ( $k_{sd}$ ):  $k_{sd} = c \cdot k_s$
- Posición de la línea de aplicación de la carga bajo el centro de curvatura de la cabeza del carril en el extremo de medida (x):  $0 \pm 1$  mm.
- Posicionamiento del aplicador, ángulo entre la línea de aplicación de carga y la normal al elemento de apoyo ( $\alpha$ )

- Carga máxima ( $F_{max}$ ):  $F_{max} = P_v / \cos a$
- Carga mínima ( $F_{min}$ ): 5 kN
- Componente vertical de la carga máxima ( $P_v$ )
- Velocidad de carga ( $v$ ):  $100 \pm 10$  kN/min
- Desplazamiento de la cabeza del carril ( $d_i^c$ )
- Desplazamientos verticales del patín del carril ( $d_i^{pv}$ )
- Desplazamientos horizontales del patín del carril ( $d_i^{ph}$ )
- Frecuencia de aplicación ( $f$ ): 4 Hz.
- Naturaleza de la onda de fatiga: senoidal
- Número de ciclos ( $N$ ): 3.000.000 ciclos
- Desplazamiento residual de la cabeza del carril ( $D^c$ )
- Desplazamiento residual vertical medio del patín del carril ( $D^{pv}$ )
- Desplazamientos residual horizontal medio del patín del carril ( $D^{ph}$ )
- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al ensayo dinámico ( $k'$ )
- Rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$ , posterior al ensayo dinámico ( $k_s'$ )
- Fuerza de apriete, posterior al ensayo ( $P_0'$ )
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al ensayo ( $F'$ )

### **5.3.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación**

Los primeros resultados obtenidos del ensayo dinámico son los desplazamientos residuales en los puntos especificados, medidas realizadas tanto para la carga máxima de ensayo, como para la mínima. Por ejemplo, para obtener el valor residual del desplazamiento de cabeza bajo carga máxima:

$$D_{max}^c = d_{max}^c(\text{previo}) - d_{max}^c(\text{posterior})$$

Los desplazamientos residuales del patín, tanto verticales, como horizontales, se obtendrán como media de los desplazamientos residuales de los dos puntos de medida.

Al desplazamiento de la cabeza del carril se le exige ser inferior a 1 mm, para carga máxima y mínima ( $D^c \leq 1$  mm). La especificación máxima para los desplazamientos del patín del carril, tanto verticales como horizontales, y tanto, para carga máxima como para carga mínima es de 0.5 mm ( $D^{ph}$  y  $D^{pv} \leq 0.5$  mm).

La especificación también exige funcionalidad adecuada en el desmontaje y posterior montaje, además de ausencia de roturas, fisuras o desgastes apreciables en todos los componentes de la sujeción.

Tras el ensayo dinámico, la repetición de los ensayo comentados anteriormente debe proporcionar unos resultados cuyos límites son los siguientes:

- ❑ Resistencia al deslizamiento longitudinal:  $F' \geq 0.8 F$
- ❑ Rigidez vertical a 80 kN:  $k' \leq 1.25 k$
- ❑ Rigidez vertical secante  $P_0/P_{0+75}$ :  $k_s' \leq 1.25 k_s$
- ❑ Fuerza de apriete:  $P_0' \geq 0.8 P_0$

## 5.4 ENSAYO DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

### 5.4.1 Justificación del ensayo

Se intenta verificar las propiedades aislantes de la sujeción, ya que ésta debe proporcionar un aislamiento de la vía de forma que no se perturbe el funcionamiento normal de las instalaciones eléctricas y de la señalización, independientemente de las condiciones atmosféricas.

### 5.4.2 Metodología

#### 5.4.2.1 Descripción del ensayo según norma

Se montan dos cupones de carril sobre una traviesa completa, con los componentes de la sujeción nuevos según la configuración indicada en la Figura 4.40

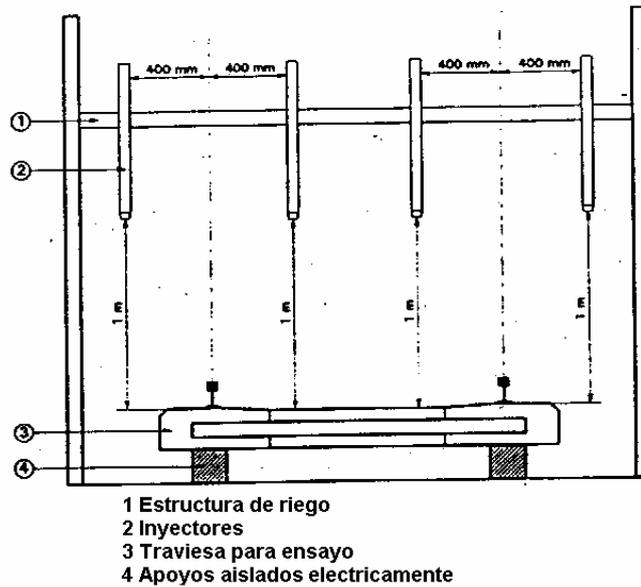


Figura 4.40. Configuración del ensayo de resistencia eléctrica [7]

Para la medida de la resistencia eléctrica se conectan los dos cupones de carril, aislados entre sí, por medio del circuito indicado en esquema de la Figura 4.41

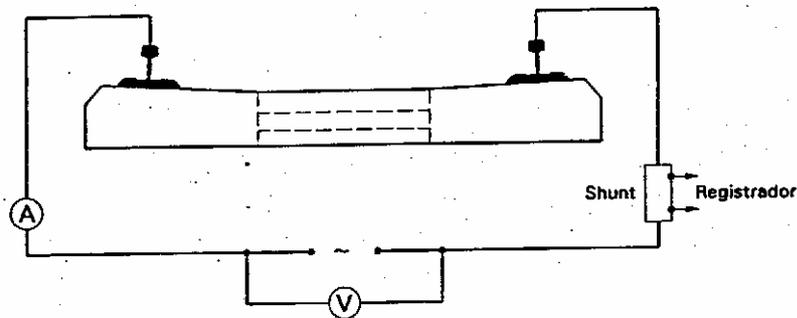
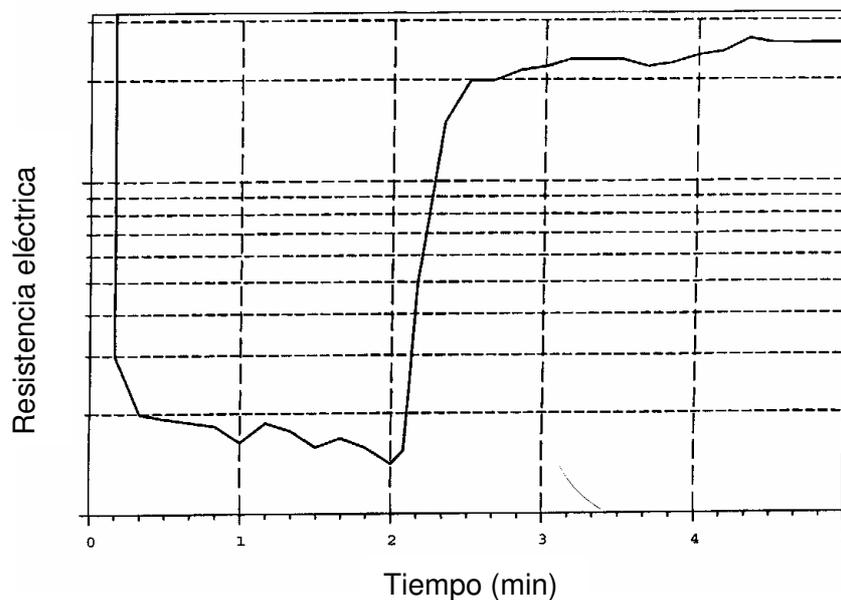


Figura 4.41. Circuito eléctrico empleado para la medida de la resistencia eléctrica [7]

Todo el conjunto se humedece mediante rociado de agua con pulverizadores. Se mide la resistencia eléctrica durante el tiempo que dura el rociado (2 minutos) y durante un mínimo de ocho minutos desde que finaliza el mismo. En la gráfica de la Figura 4.42 se muestra un detalle de los primeros cinco minutos de un ensayo genérico.



**Figura 4.42.** Evolución de la resistencia eléctrica al comienzo del ensayo

El ensayo se repite dos veces más. Si se usa la misma travesía, se dejarán transcurrir 24 horas o el tiempo necesario para que la superficie quede seca.

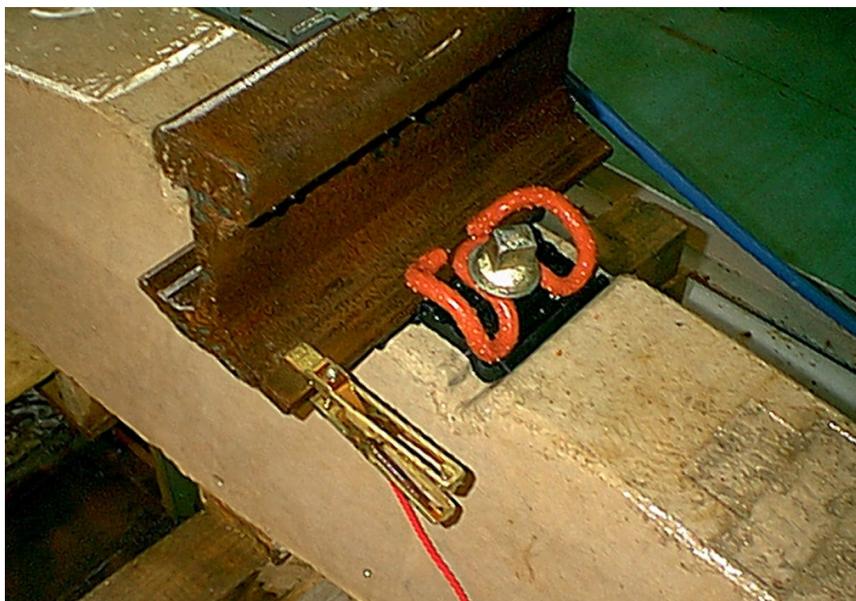
Se debe realizar una corrección en función de la conductividad del agua utilizada para el ensayo.

#### 5.4.2.2 Metodología experimental propuesta

Sobre una travesía completa se montan dos cupones de carril y dos conjuntos de sujeción completos con elementos nuevos. Entre los dos cupones metálicos se aplica una corriente alterna de 20-40 voltios y 50 Hz, empleando, para ello, un transformador de corriente alterna. La travesía se coloca debajo de un pórtico constituido por dos soportes y una tubería con dos tomas de agua, una en cada extremo, dotada de cuatro pulverizadores que proporcionan, individualmente, un caudal de 8 l/min. En la Figura 4.43 se observa la disposición de los diferentes elementos empleados en el ensayo de resistencia eléctrica, y en la Figura 4.44 se muestra un detalle de la conexión del cupón de carril al circuito eléctrico.



**Figura 4.43.** *Dispositivo empleado para el ensayo de resistencia eléctrica*



**Figura 4.44.** *Detalle de la conexión del circuito al cupón de carril*

La traviesa se moja mediante el intenso rociado de agua por medio de los pulverizadores durante 2 minutos. A lo largo del regado, y durante 8 minutos más, se registra la intensidad de corriente medida en el circuito eléctrico. A partir de estos valores, se calcula el valor de la resistencia eléctrica mínima que,

posteriormente, se corrige en función de la conductividad del agua utilizada en el ensayo, para determinar la resistencia eléctrica característica (R) del sistema de sujeción.

El ensayo se repite dos veces más sobre los mismos componentes con un intervalo mínimo de 24 horas entre ensayos consecutivos, para permitir el secado de la traviesa y del resto de los elementos de la sujeción.

#### 5.4.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo

La corriente alterna será convertida por un transformador convencional de 220 V a 20-40 V. Las medidas de voltaje e intensidad se realizarán por medio de un multímetro para corriente alterna. Se utilizará un dispositivo provisto de cuatro pulverizadores de las características indicadas en la especificación técnica.

#### 5.4.2.4 Parámetros de ensayo

- Conductividad del agua utilizada ( $C_a$ ): 20-80 mS/m
- Factor de corrección por la conductividad del agua utilizada ( $K_a=0,03 \cdot C_a$ )
- Temperatura del agua utilizada ( $T_a$ ): 10-20 °C
- Caudal de agua por cada pulverizador (q): 8 l/min
- Presión de agua (P): 1kN/m<sup>2</sup>
- Cono del pulverizador: 100-125 °
- Corriente alterna (AC): 20-40 V, 50±15 Hz
- Tiempo de rociado (t): 2 min
- Resistencia eléctrica mínima para cada ensayo ( $R_{min}^i$ )
- Resistencia eléctrica corregida para cada ensayo ( $R_C^i$ )
- Resistencia eléctrica característica del sistema (R)

### **5.4.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación**

A partir de la resistencia mínima obtenida en cada uno de los tres ensayos ( $R_{\min}^i$ ), se calcula la resistencia eléctrica corregida por medio de la expresión:

$$R_c^i = K_a R_{\min}^i \quad (4.12)$$

Con los tres valores de resistencia corregidos, por cada ensayo, se obtiene la resistencia eléctrica característica del sistema de sujeción como la media de todos ellos:

$$R = \frac{\sum R_c^i}{3} \quad (4.13)$$

La especificación técnica para la resistencia eléctrica característica del sistema requiere un valor mínimo de 5 k $\Omega$  ( $R \geq 5 \text{ k}\Omega$ ).

## **5.5 ENSAYO DE RESISTENCIA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES ADVERSAS**

### **5.5.1 Justificación del ensayo**

Es necesario conocer los efectos de la exposición a condiciones medioambientales severas en los sistemas de sujeción, sobre todo la corrosión de sus elementos metálicos.

Debe exigirse a la fijación la mayor durabilidad posible, como mínimo la del carril e igual a la de la traviesa de hormigón para los elementos de anclaje insertados en ellas, sabiendo que pueden estar sometidas a un entorno con condiciones climáticas adversas: hielo, humedad, radiaciones ultravioletas, etc.

### **5.5.2 Metodología**

#### *5.5.2.1 Descripción del ensayo según norma*

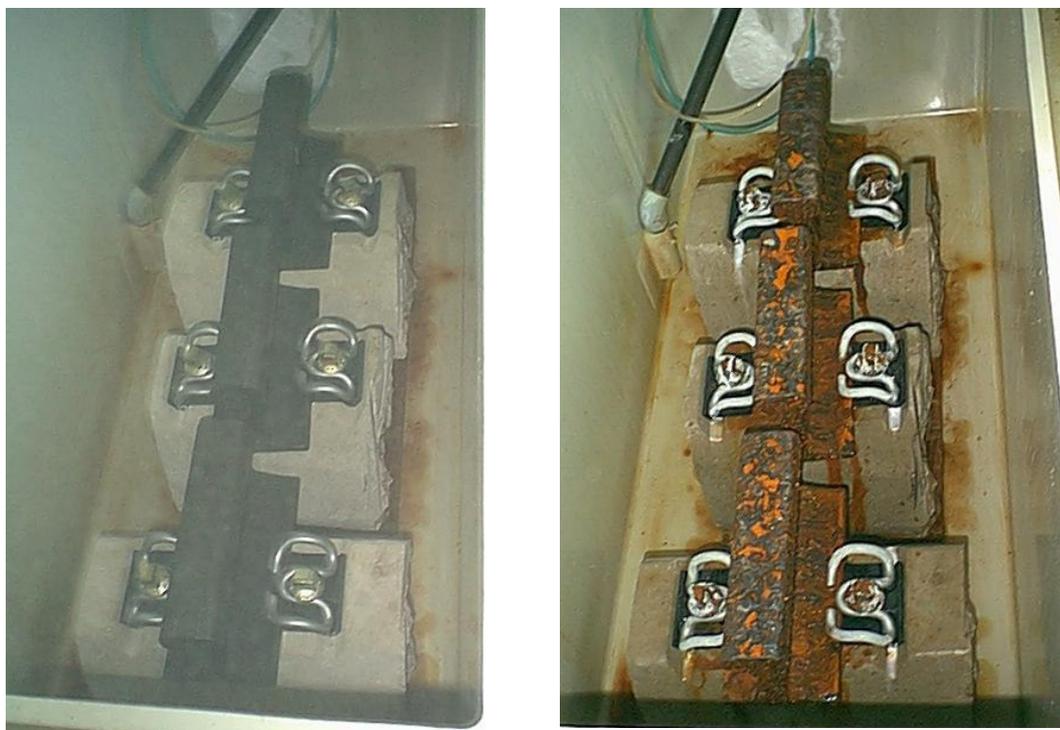
El sistema, montado sobre un cupón de carril, se somete a una solución salina, mediante rociado, durante un tiempo prefijado, tras el cual se desmontan los componentes y se vuelven a examinar, registrándose de nuevo su aspecto,

montándose finalmente. Se realiza esta operación sobre tres componentes nuevas.

#### 5.5.2.2 Metodología experimental adoptada

La prueba se realiza sobre tres cupones de traviesas montadas con su conjunto de sujeción completo y sus correspondientes cupones de carril.

Si el sistema de sujeción se basa en la aplicación de un par de apriete prefijado, se procede, una vez montados con su par de apriete nominal, a verificar su par de desapriete para comprobar la pérdida de apriete instantánea de la sujeción en condiciones normales, o sea, no envejecidas. Comprobada la pérdida de apriete instantáneo antes del envejecimiento se introducen los cupones montados en la cámara de nieblas salinas, donde permanecen el tiempo de ensayo. En la Figura 4.45 se muestra el aspecto de las probetas de ensayo al comenzar el ensayo y transcurrido el tiempo de ensayo.



**Figura 4.45.** Comienzo y final del ensayo de resistencia a las condiciones ambientales adversas

Una vez finalizado el ensayo se determina de nuevo el par de desapriete para contrastar el efecto producido en el apriete de la sujeción por las condiciones ambientales agresivas.

#### *5.5.2.3 Equipamiento necesario para la realización del ensayo*

Se empleará una cámara de nieblas salinas que cumpla las especificaciones indicadas en la norma ISO 9227: 1990 [67]

#### *5.5.2.4 Parámetros de ensayo*

- Tiempo de rociado en lluvia salina (t): 300 horas
- Concentración de NaCl: 5 % en peso

### **5.5.3 Resultado obtenido y valor límite indicado en la especificación**

El aspecto de los elementos de la sujeción, tras el ensayo de resistencia a condiciones ambientales adversas, se puede apreciar en la Figura 4.46.



**Figura 4.46.** *Resultado del ensayo de condiciones adversas climáticas*

Los elementos no metálicos no sufren ataque visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondos y clips, se puede apreciar un grado de deterioro localizado, en las superficies expuestas a la atmósfera corrosiva, principalmente en las zonas de contacto con otros elementos como el patín del carril y el tirafondo, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector.

A continuación, se procede, de nuevo, a realizar el montaje de los conjuntos ensayados, comprobando la funcionalidad del sistema.

La normativa especifica que, en ninguno de los casos, los efectos producidos por el ensayo deben afectar a la funcionalidad del sistema tras su desmontaje y posterior montaje.