



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 5

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN: OPCIONES Y CARACTERIZACIÓN

1. GENERALIDADES

Uno de los objetivos de partida de la Tesis es el de seleccionar aquel sistema de sujeción que pueda adaptarse mejor a las características de circulación que se establecen para los trazados de la alta velocidad española.

Se desecha, de entrada, una sujeción de tipo rígido, ya que las mismas fijan fuertemente el carril a la traviesa y hacen repercutir sus movimientos en los desplazamientos de ésta, lo que ocasiona fricciones en la capa de balasto sobre la que asienta dicha traviesa y roces del propio carril con los elementos que conforma la sujeción, que se acentúan cuando éstos se aflojan por el trabajo al que están sometidos. En resumen, no se trata de un buen sistema para la alta velocidad ya que deteriora la sujeción, la traviesa y el balasto.

Por el contrario, las sujeciones de comportamiento elástico presentan posibilidades más amplias para mantener la posición del carril, ya que restringen sus movimientos y disminuyen su manifestación, al absorber la energía que produciría su desplazamiento y al devolverla nuevamente, obligando al carril a retornar a su estado primitivo, es decir, actuando en forma semejante a un muelle.

La ventaja fundamental de este tipo de sujeciones sobre las rígidas consiste en permitir movimientos verticales del carril al paso de las circulaciones amortiguándose, así, la energía de los choques que se originan. Para que estos movimientos se produzcan sin ningún juego entre el carril y la traviesa, existe un elemento elástico que aprieta el carril contra la traviesa y funciona a modo de muelle, absorbiendo las deformaciones de las placas de asiento de los carriles.

Se parte de la experiencia previa obtenida en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, por lo que será de mucha utilidad a la hora de optimizar el nuevo sistema de sujeción.

Se tomará, como punto de partida, una sujeción de comportamiento elástico e indirecta, del tipo HM empleada en el trazado Madrid-Sevilla, en la que se irán introduciendo algunas modificaciones, hasta conseguir optimizar el sistema de sujeción.

El desarrollo de este capítulo se ha dividido en dos apartados:

- ❑ propuesta de soluciones alternativas para los diferentes componentes del sistema de sujeción.

- ❑ y caracterización experimental del comportamiento de diferentes configuraciones en las que se intercambia algún componente de la sujeción.

Se completa este capítulo con el siguiente en el que se realiza un análisis de los resultados obtenidos y con la selección de la solución óptima.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA LÍNEA MADRID-SEVILLA

La solución empleada en la línea Madrid-Sevilla es una sujeción HM (SKL-1) montada en la traviesa monobloque de hormigón AI-89, con carril UIC 60.

La sujeción consta de los siguientes componentes (Figura 5.1):

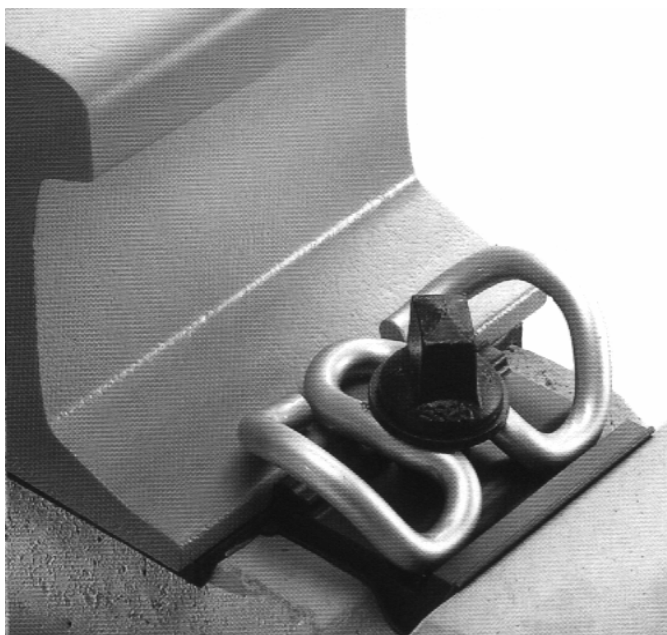


Figura 5.1. *Sujeción HM (SKL 1) [8]*

- ❑ Grapa o clip elástico. Se trata de una pieza de acero de muelle de sección circular y de forma característica (forma de letra griega épsilon).
- ❑ Tirafondo de acero.
- ❑ Espiga roscada de polietileno (PE) para el alojamiento del tirafondo. Su forma es tronco-cónica, está ondulado exteriormente para mejorar la adherencia con el hormigón de la traviesa y va provista de un fileteado interior a fin de roscar el tirafondo.
- ❑ Placa acodada para guía del carril. Es una pieza de Poliamida 6 reforzada con fibra corta de vidrio en un 30 % en peso, de forma especial a modo de codo en V en uno de sus extremos, que permite su acoplamiento en un

alojamiento específico de la traviesa, con objeto de fijar su posición y, por tanto, la del carril.

- Placa de asiento del carril fabricada en copolímero EVA.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES SOLUCIONES ESTUDIADAS INICIALMENTE PARA EL SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD

Las mayores exigencias derivadas de diseñar una nueva línea en la que las velocidades de circulación serán sensiblemente superiores conducen a un replanteo de todos los elementos que conforman la superestructura de vía. La manifestación práctica de ello, se traduce en los requisitos recogidos en las distintas especificaciones redactadas por el ente gestor responsable de la ejecución del nuevo trazado (GIF). Así, los concernientes a la sujeción han sido objeto de revisión en el capítulo anterior.

En la búsqueda de alternativas que satisfagan los valores fijados en las mencionadas especificaciones, se ha contado con la colaboración de los fabricantes y suministradores que han aportado modificaciones de los diferentes componenetes, o nuevos prototipos, cuya validación es el objetivo de este capítulo.

3.1. MODIFICACIONES PROPUESTAS A LA SUJECIÓN HM

La primera de las soluciones estudiadas será del tipo HM, similar a la empleada en el trazado Madrid-Sevilla, en la que se irán introduciendo una serie de modificaciones.

3.1.1. Clip elástico

El tipo de clip empleado es el SKL-1, siendo el componente que confiere la propiedad fundamental a una sujeción de este tipo, su comportamiento elástico.

Se trata de un elemento fabricado a partir de un perfil de acero de sección circular de 13 mm de diámetro. Esta fabricado con un acero especial de muy altas características elásticas (40 Si 7), cuya composición química corresponde a los valores indicados en la Tabla 5.1. Una vez confeccionadas las piezas con la geometría definitiva, se someten a un tratamiento térmico de temple en agua seguido de revenido mediante hornos continuos [68].

Tabla 5.1.- Límites de la composición del acero empleado en los clip

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%) max	S (%) max
0.37-0.44	0.60-0.80	1.50-1.90	0.040	0.040

En la Figura 5.2 se puede observar la geometría característica del clip elástico que recuerda a la letra griega epsilon.

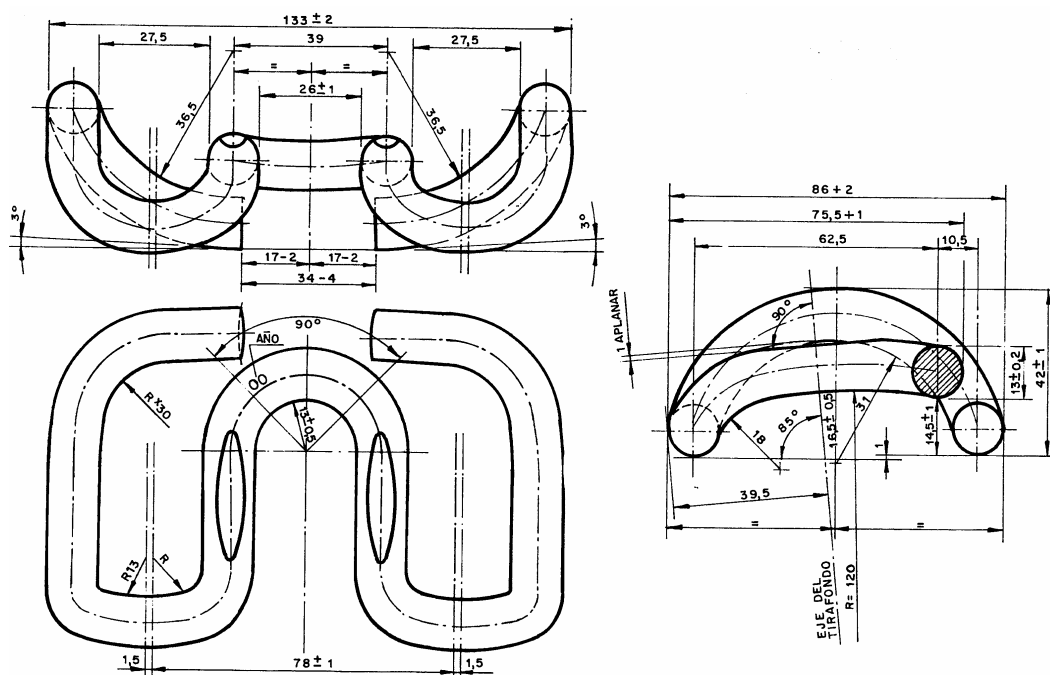


Figura 5.2. Clip SKL-1 [69]

El clip trabaja a flexo-torsión alojándose en el codo de la placa acodada y deformándose por efecto del par aplicado sobre el tirafondo/tornillo. Esta deformación será la que proporciona la fuerza elástica para fijar el carril, que para este tipo de clip en concreto, SKL-1, se sitúa en torno a los 18 kN por pareja de

clips. El clip acompaña al movimiento del carril deformándose y recuperando esa deformación cuando el carril vuelve a su posición original.

Para el clip elástico se facilitaron 3 posibles soluciones:

- ❑ Clip A, de color verde (Figura 5.3.a)
- ❑ Clip B, de color granate (Figura 5.3.b)
- ❑ Clip C, de color plateado (Figura 5.3.c)

a) Clip A



b) Clip B



c) Clip C



Figura 5.3. *Tipologías de clip elástico*

Ante la igualdad geométrica y las limitaciones impuestas en la composición química del acero constituyente, se intuye una respuesta similar en su comportamiento mecánico, por lo que la diferencia entre ellos radicará en su comportamiento ante la corrosión. Esta diferencia viene establecida por la naturaleza de su recubrimiento.

Los clips A y B, previamente a la recepción de la capa anticorrosión, primero se granallan, después se fosfatan y se secan con aire forzado en estufa, por último, se pintan. El clip A se pinta a pistola epoxi (polvo) y posteriormente se introduce en estufa para fundir la pintura (polimerización) y secar. El clip B se pinta por inmersión (pintura líquida) y posteriormente se introduce en estufa para secar.

El clip C ha sido revestido con DACROMET® en una capa de espesor muy fino. El revestimiento consiste en dispersiones al agua que contienen óxidos metálicos, zinc metálico y laminillas de aluminio. Las plaquetas de zinc y aluminio se alinean en múltiples capas que conforman un revestimiento metálico gris plata. Aplicado como material líquido, el revestimiento posteriormente se transforma en una capa totalmente inorgánica después de solidificar a 321 °C [70]. En la Figura 5.4 se muestra el aspecto de la película captada por medio de microscopio electrónico de transmisión a 80.000 aumentos en la que pueden verse las capas formadas por las plaquetas de zinc y aluminio.



Figura 5.4. Detalle de la película protectora de DACROMET® [70]

Los principales beneficios aportados por el recubrimiento DACROMET® según el fabricante son los siguientes:

- ❑ Cuádruple resistencia a la corrosión:
 - Protección de barrera: Las múltiples laminillas superpuestas de zinc y aluminio proporcionan una excelente barrera
 - Acción galvánica: El zinc se corroe para proteger al acero
 - Pasivación: Los óxidos metálicos en la matriz desaceleran la reacción corrosiva del zinc y del acero
 - Autorreparación: Los sectores dañados del revestimiento se rellenan con óxidos y carbonatos de zinc
- ❑ Capacidades bimetálicas: Debido a la concentración que tiene el aluminio en el revestimiento, se logra una buena resistencia a la corrosión bimetálica.
- ❑ Resistencia a los solventes: Cuando DACROMET® se solidifica sobre la superficie metálica, el revestimiento se torna inorgánico y, como consecuencia, resistente a los solventes, gasolina y líquido para frenos entre otros.
- ❑ Conductor eléctrico: La elevada concentración de laminillas metálicas permite que las piezas con DACROMET® sean conductoras de la electricidad.
- ❑ Libre de fragilidad cáustica por hidrógeno: La ausencia de ácidos o electrólisis en el proceso de revestimiento garantiza que no se produzca la fragilidad cáustica por hidrógeno que, por lo común, se asocia con el proceso de electrogalvanizado.

3.1.2. Anclaje

El anclaje de la sujeción está formado por dos elementos, la espiga o vaina embebida en el hormigón de la traviesa y el tornillo o tirafondo que se rosca en el interior de la primera.

Entre las funciones principales que se le exigen a la espiga se encuentran:

- Una resistencia adecuada a la extracción o rotura

- Un buen aislamiento eléctrico
- Capacidad para amortiguar los movimientos de la sujeción intentando no transmitirlos a la masa de hormigón y evitar, de esta forma, fisuraciones prematuras.
- Durabilidad y resistencia a agentes externos

Por todas estas razones las soluciones propuestas están formadas fundamentalmente por materiales poliméricos o materiales compuestos con matriz polimérica.

La opción de partida es la utilizada en la línea Madrid-Sevilla. Se trata de una espiga de polietileno a baja presión (Sdū) y cuya geometría puede verse en las Figuras 5.5 y 5.6.

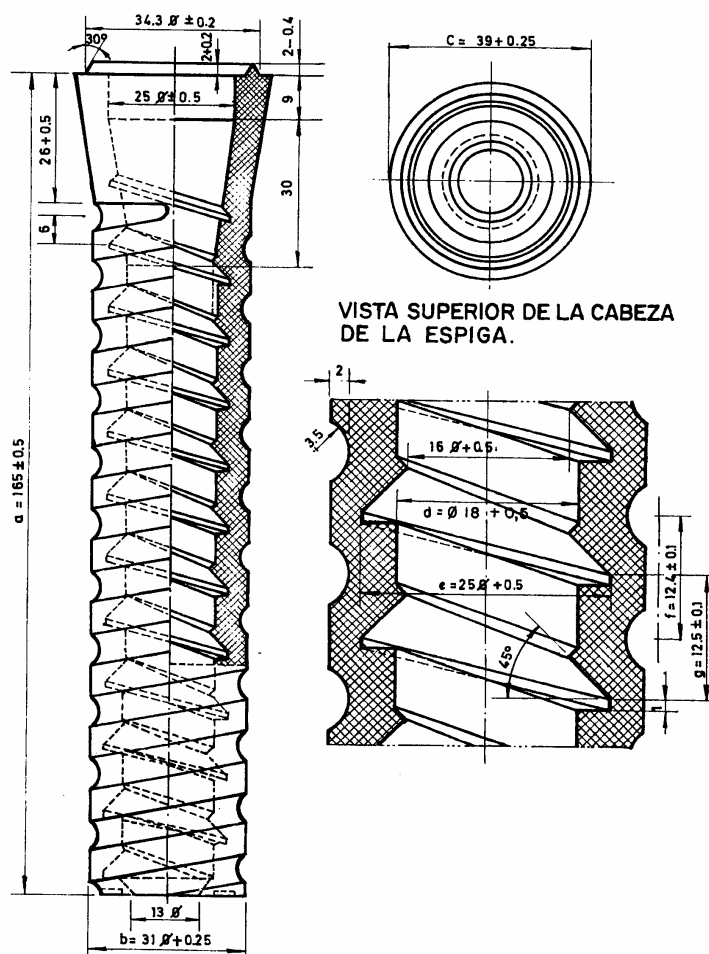


Figura 5.5. Geometría de la espiga de polietileno [31]

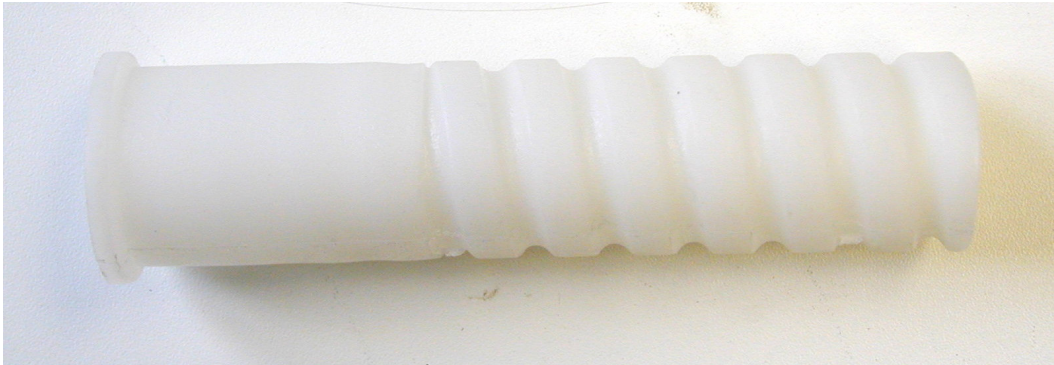


Figura 5.6. *Aspecto de la espiga de polietileno*

Como puede observarse, la espiga está dotada de dos roscas diferentes y con hélices de sentido contrario, una interior para alojar al tirafondo que completa el anclaje y la otra exterior sobre la que se rosca un muelle metálico que incrementa su resistencia a la extracción.

El tirafondo empleado con esta espiga es el Tirafondo nº 9, que puede presentarse con dos acabados diferentes, pavonado y galvanizado + cromatado como se puede observar en la figura Figura 5.7.

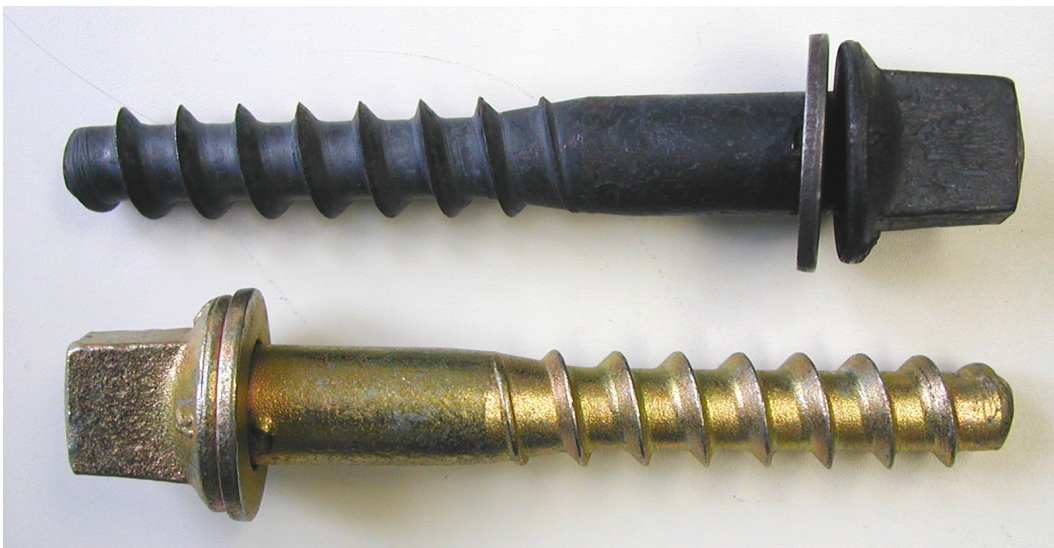


Figura 5.7. *Aspecto los dos acabados del tirafondo*

Una propuesta de modificación consiste en una solución equivalente geoméricamente, pero mejorada notablemente en su comportamiento mecánico ya que se ha sustituido el polietileno de baja presión por un material con mejores propiedades ingenieriles. Se trata de un material compuesto de una matriz de poliamida 6.6 y reforzado por fibras cortas de vidrio en un 35 % en peso. Los tirafondos empleados en este caso son los mismos que en el caso anterior.

Otra alternativa propuesta recibe la denominación de sistema GS. El material de la espiga es también Poliamida 6.6 reforzada con 35 % de fibra corta de vidrio en peso. Exteriormente también va reforzada con una espiral metálica de forma que se mejora la adherencia al hormigón de la traviesa y se contienen mejor los esfuerzos que el tirafondo pueda ejercer sobre el hormigón. Existe una diferencia fundamental con la solución anterior en la geometría de la rosca del tirafondo y, por tanto, de la rosca interior de la espiga, al sustituir el perfil triangular empleado por la rosca del tirafondo por otro trapezoidal, pero manteniendo el mismo paso. En la Figura 5.8, se muestra el aspecto que presenta el tirafondo del anclaje GS que, como puede verse, presenta un tratamiento de galvanizado y cromatado. Este cambio obedece a que el perfil triangular del tirafondo habitual daña enormemente la espiga en su montaje, lo que puede causar problemas en futuros montajes y desmontajes. Con el perfil trapezoidal, no se daña tanto la espiga en el apretado, pudiéndose reutilizar en las mismas condiciones que la inicial.



Figura 5.8. Aspecto del tirafondo del anclaje GS

Por último se analiza la solución PLASTIRAIL, marca registrada y patentada por VAPE RAIL INTERNACIONAL.

El modelo de anclaje VAPE propuesto se denomina 22-115 (que indica el diámetro nominal de la rosca y largo de la vaina) y se compone de dos elementos principales:

- ❑ Una vaina moldeada en compuesto termoplástico, engastada entre dos medias conchas metálicas (Figura 5.9 y Figura 5.10).
- ❑ Un tirafondo de acero forjado con un filete conformado en frío con un revestimiento galvanizado con zinc bicromado (Figura 5.11 y Figura 5.12)

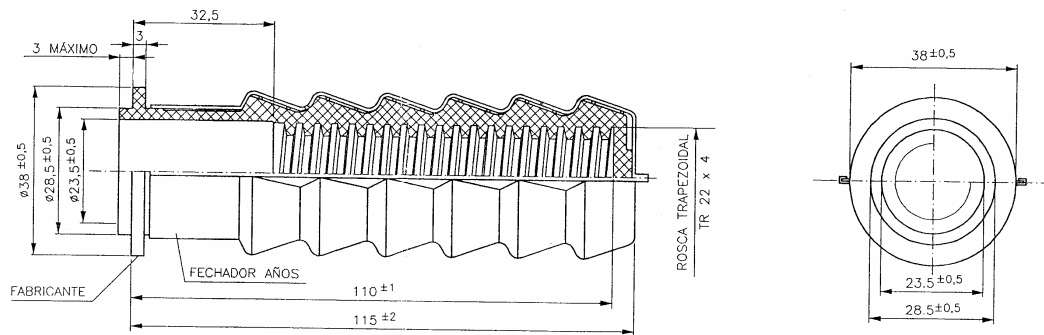


Figura 5.9. Geometría de la vaina VAPE [71]

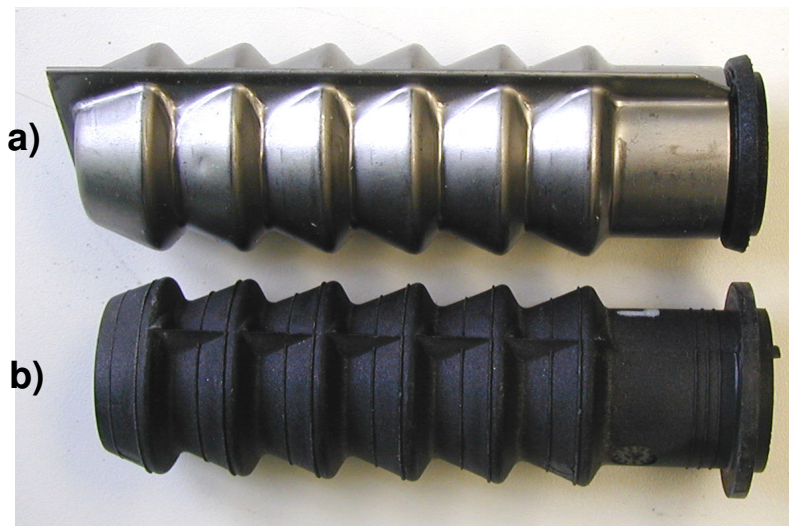


Figura 5.10. Aspecto de la vaina VAPE. a) Con concha y b) sin concha

La vaina VAPE incluye secciones anulares que permiten aumentar sus prestaciones bajo fuerzas de extracción o arrancamiento. Las resultantes f del esfuerzo de tracción F se distribuyen en los varios anillos y están así alejados de la zona frágil del hormigón, ZN, gracias a la orientación de las superficies de contacto (ver Figura 5.14). Además, las dos uñas diametralmente opuestas y distribuidas a lo largo de los anillos impiden cualquier rotación de la vaina plástica dentro de la concha metálica, al igual que la del conjunto de la vaina en el hormigón de la traviesa [73].

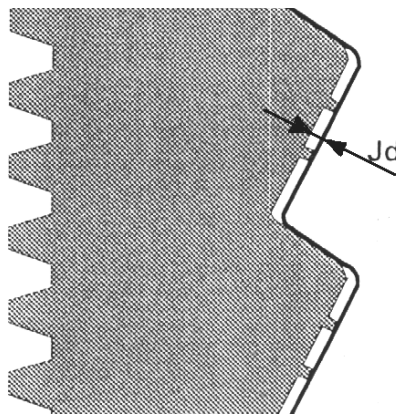


Figura 5.13. Juego diametral, J_d , entre el plástico y la chapa metálica [73]

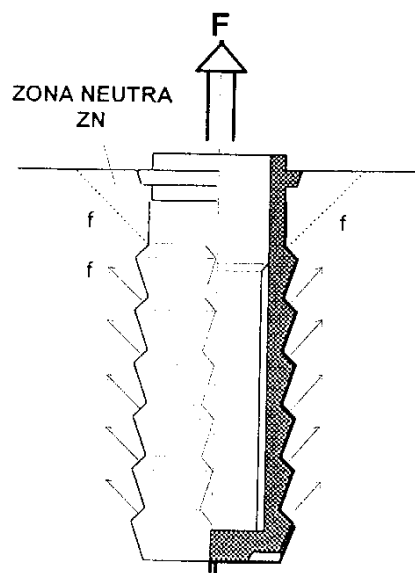


Figura 5.14. Distribución de los esfuerzos de la vaina al hormigón [73]

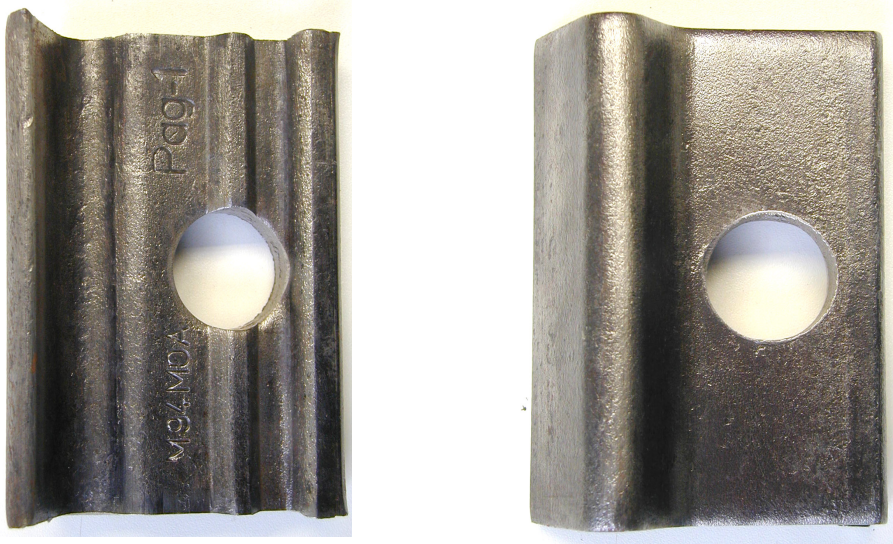


Figura 5.16. *Aspecto de la placa acodada metálica*

En este trabajo se ha partido directamente de la modificación introducida sobre esta pieza para su uso en el trayecto Madrid-Sevilla, donde se empleó como placa acodada la Pag-0.

La placa Pag-0 tiene la misma geometría que la envolvente de las dos piezas que forman la sujeción original, pero está confeccionada, totalmente, con un material compuesto de PA 6 por matriz y un refuerzo del 30 % en peso de fibra corta de vidrio.

Para esta solución se dispone de Especificación Técnica propia [74] lo que supone ciertas garantías adicionales para la placa. La placa analizada de estas características recibe el sobrenombre de “maciza” para distinguirla de otras soluciones, por su sección sin nervadura alguna, siendo su geometría y aspecto los que se reflejan en la Figura 5.17 y Figura 5.18.

La tercera placa acodada analizada fue la placa aligerada A2, inyectada en poliamida 6.6 con un refuerzo del 35 % en peso de fibra corta de vidrio. Se trata de una evolución de la placa maciza con un comportamiento mecánico similar, pero con un ahorro en material en torno al 40 % [76]. Por este motivo a estas placas se las bautizó con el apodo de “ligeras”. Las placas A2 fueron inyectadas por varios fabricantes diferentes, codificados por las letras A, B, C, D, E y M.

El Grupo de Materiales de la Universidad de Cantabria tuvo una participación activa en el proceso de desarrollo, control de comportamiento y definición del proceso de homologación de este componente [77]. Esta placa acodada, también dispone de Especificación Técnica [78], por lo que, ya había superado previamente los niveles de seguridad establecidos en el proceso de homologación de la misma. En las Figuras 5.19 y 5.20 se presenta la geometría y aspecto de la placa acodada ligera A2.

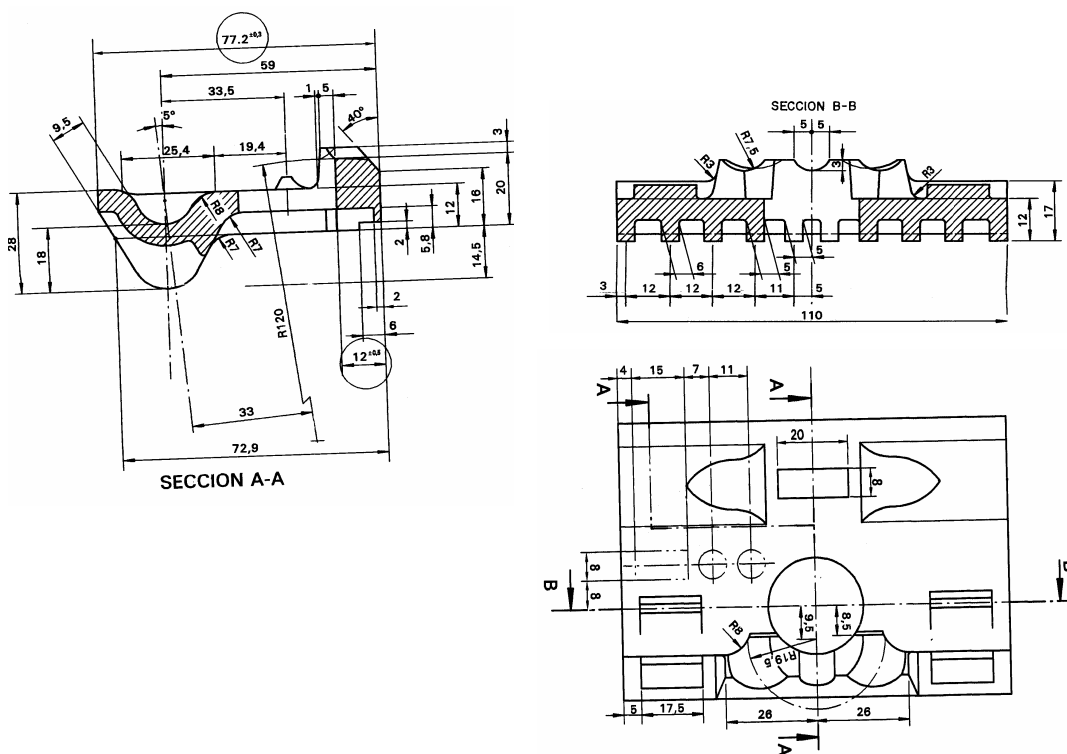


Figura 5.19. Geometría de la placa acodada ligera A2 [79]

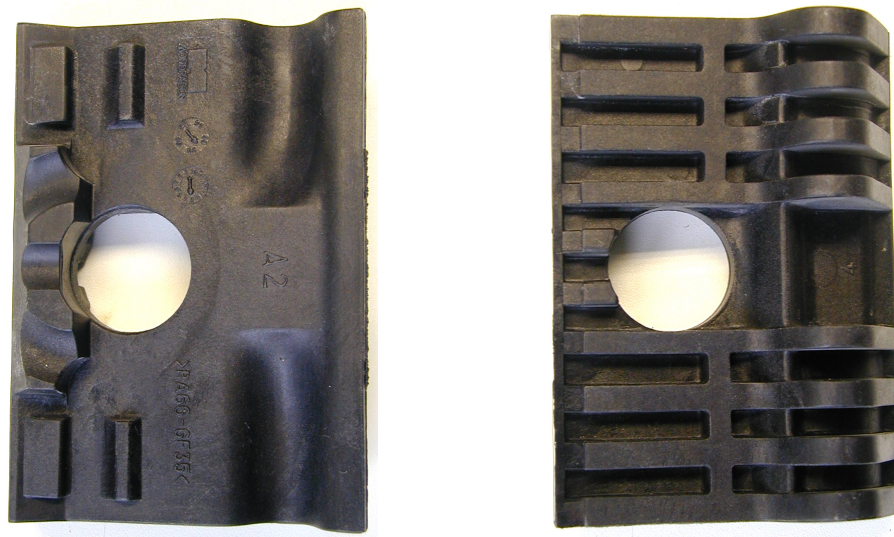


Figura 5.20. Aspecto de la placa acodada ligera A2

Por último, se analizó, como cuarta opción, una placa acodada a caballo entre la solución maciza y la solución aligerada, que recibió el sobrenombre de “híbrida”. Está inyectada en Poliamida 6.6 reforzada con un 35 % en peso de fibra corta de vidrio y el aspecto que presenta puede verse en la Figura 5.21. Al igual que la Pag-0 de PA 6.6 + 35 % FG no dispone de especificación técnica por lo que no fue sometida a un control específico previamente a los ensayos de optimización de la sujeción.

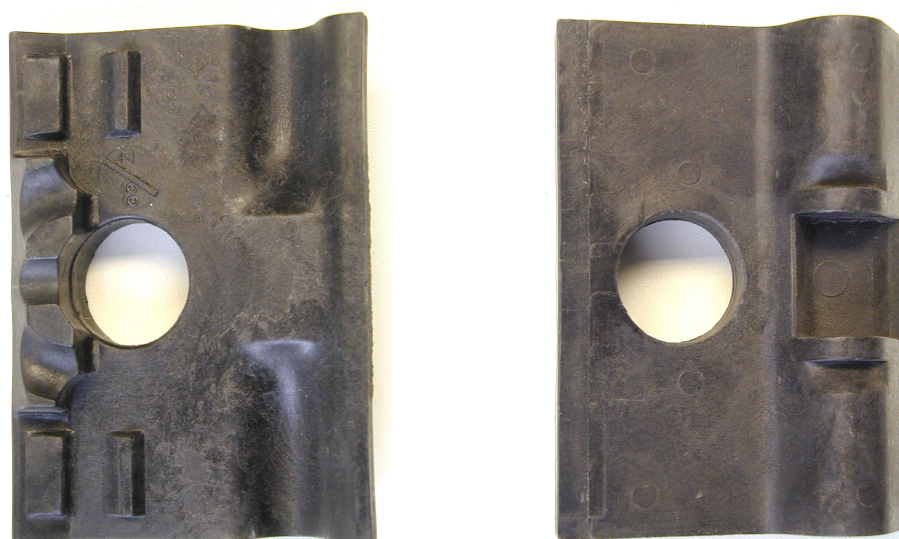


Figura 5.21. Aspecto de la placa acodada “híbrida”

3.1.4. Placa de asiento

Como puede observarse al analizar la sistemática de caracterización de la sujeción descrita en el capítulo 4, la placa de asiento es el componente sometido a un mayor control, dedicándole tanto ensayos específicos (rigideces estáticas y dinámicas y atenuación de impactos) como participando activamente en el resultado de otros (fuerza de apriete, deslizamiento longitudinal, fatiga bajo carga inclinada, etc.).

Los valores especificados para la nueva línea de alta velocidad en lo referente a la rigidez de la placa de asiento para los cuatro ensayos definidos (vertical a 80 kN, vertical secante P_0/P_0+75 kN, vertical secante 100/200 kN, dinámica a baja frecuencia) dejan fuera la de espesor uniforme de 6 mm de copolímero EVA colocada en el AVE Madrid-Sevilla (con una rigidez nominal en torno a los 1000 kN/mm) y la de caucho empleada en las traviesas bloque, también de 6 mm y con una rigidez cercana a los 300 kN/mm.

Para el diseño de la placa de asiento del nuevo trazado el GIF ha incrementado el espesor respecto al de Madrid-Sevilla en 1 mm, permitiendo libertad en la selección de material y de geometría, siempre y cuando la envolvente de la misma se ajuste a un paralelepípedo de 178x145x7 mm.

Las soluciones presentadas en este apartado son el resultado de estudios previos conjuntos entre los fabricantes de placas de asiento y el Grupo de Materiales de la Universidad de Cantabria (LADICIM) [80-83]. En estos trabajos iniciales, se definió el material y la geometría de las placas de asiento en base a los resultados obtenidos en las cuatro pruebas incluidas en la Especificación Técnica relacionadas con la rigidez de la placa de asiento (rigidez 5/80, rigidez P_0/P_0+75 , rigidez 100/200 y rigidez dinámica a baja frecuencia).

Las alternativas propuestas finalmente para la placa de asiento son las siguientes:

- ❑ Placa modelo A. Placa de asiento inyectada en TPE (elastómero termoplástico de poliéster), fabricado por DSM bajo el nombre comercial de ARNITEL®, cuya geometría se muestra en la Figura 5.22. Como puede observarse en dicha figura, tanto por una cara, como por la otra, su característica distintiva es la presencia de unos resaltes rectangulares dispuestos al tresbolillo.
- ❑ Placa modelo B. Inyectada en el mismo material TPE, en este caso fabricado por Du Pont y denominado HYTREL®, con una geometría en donde los resaltes tienen forma de oblongo, situados igualmente al tresbolillo en ambas caras (Figura 5.23)
- ❑ Placa modelo C. Inyectada en copolímero EVA (Etileno/Acetato de Vinilo), con una disposición de los resaltes diferente a las anteriores, ya que la cara superior, en contacto con el carril, es lisa, mientras que, la inferior, en contacto con la traviesa, tiene unos resaltes troncocónicos de diferentes tamaños (Figura 5.24). Se presentaron dos modelos de diferente dureza: uno blando (modelo C0) y otro un poco más duro (modelo C1).

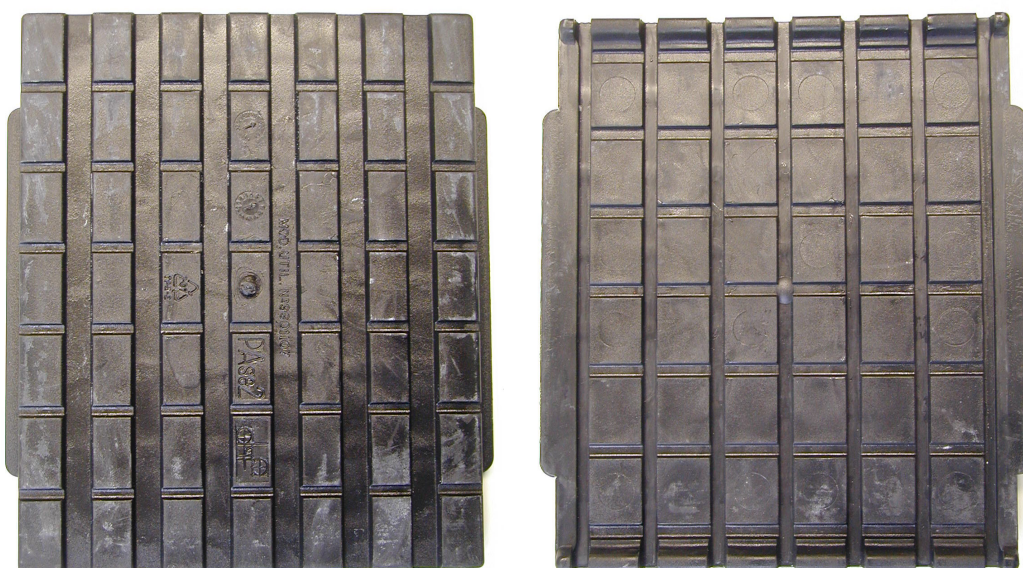


Figura 5.22. Aspecto de la placa de asiento Modelo A

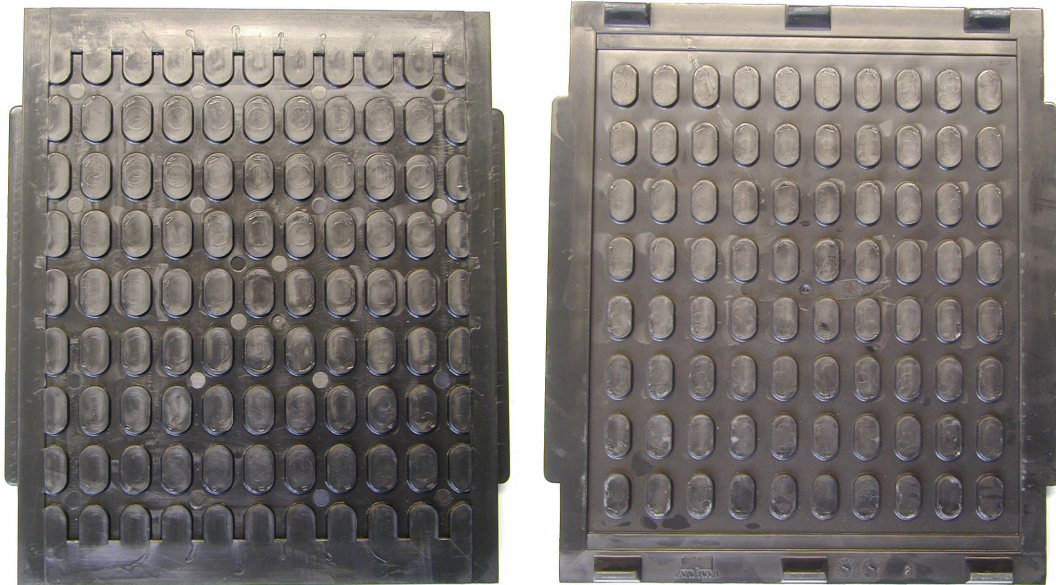


Figura 5.23. *Aspecto de la placa de asiento Modelo B*

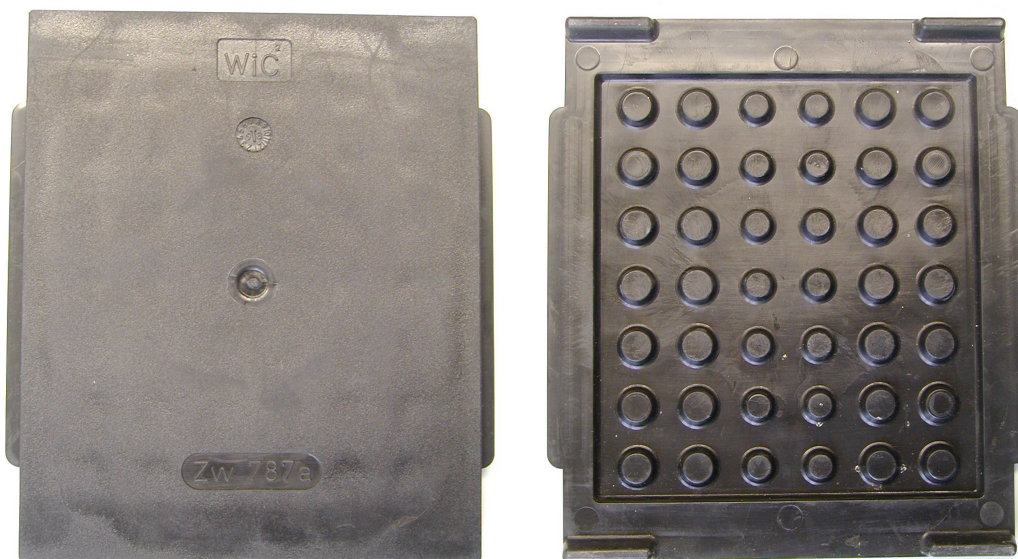


Figura 5.24. *Aspecto de la placa de asiento Modelo C*

Dos de las placas analizadas están inyectadas en elastómeros termoplásticos (TPE). Estos materiales se basan en un sistema de fases separadas, en el que alternan una fase de cadenas muy elásticas, que le confieren las características propias de un caucho, con cadenas rígidas y fuertes, formando una fase diferente, de forma que a temperatura ambiente presentan una gran rigidez y cohesión,

creando un entrecruzamiento físico similar al producido por el entrecruzamiento químico en la vulcanización. Este entrecruzamiento físico impide el desplazamiento de las cadenas bajo la aplicación de un esfuerzo, pero al no estar reticuladas químicamente pierden su cohesión al elevar la temperatura por encima de su transición vítrea. La posibilidad de fluir por calentamiento y de solidificar por enfriamiento permite la producción de materiales de caucho por técnica de procesado empleadas en la industria del plástico (inyección, extrusión,...), eliminando el proceso de vulcanización, lento e irreversible [84].

El TPE es un polímero que combina las mejores características de los elastómeros de elevadas prestaciones con las de los termoplásticos técnicos. Entre sus propiedades principales se podría destacar una tenacidad y resiliencia importantes; una elevada resistencia a la fluencia, al impacto y a fatiga por flexión; flexibilidad a bajas temperaturas; buena retención de propiedades a altas temperaturas y buena resistencia a muchos productos químicos, aceites y disolventes. Su principal inconveniente es su elevado coste.

La otra opción analizada está inyectado es un material más económico formado en base al copolímero EVA (Etileno/Acetato de Vinilo).

3.2. SUJECIÓN SKL-14

Fuera de la solución basada en la sujeción SKL-1, se presentó como posible alternativa la sujeción tipo SKL-14, cuyo aspecto se muestra en la Figura 5.25.

Se trata, también, de una sujeción directa de comportamiento elástico. Su funcionamiento mecánico es similar al sistema SKL-1, existiendo, solamente, diferencias desde el punto de vista geométrico de alguno de sus componentes. Concretamente, la diferencia estriba en el clip y la placa acodada, el resto, la placa de asiento y el anclaje, son intercambiables entre ambos sistemas. La diferencia entre clips se aprecia claramente en la Figura 5.26, donde se puede comprobar que las patillas del clip SKL-14 son ligeramente mayores, propiedad ésta que le proporcionará una mayor flexibilidad. La otra diferencia radica en la

geometría de la placa de apoyo del clip, la sujeción SKL-14 consta de una placa acodada similar a la Pag-0 (Wfp14K) cuya parte superior está preparada para adaptarse a la forma del clip (Figura 5.27).



Figura 5.25. *Aspecto de la sujeción SKL-14 [85]*



Figura 5.26. *Diferencia entre el clip SKL-1 y el SKL-14*

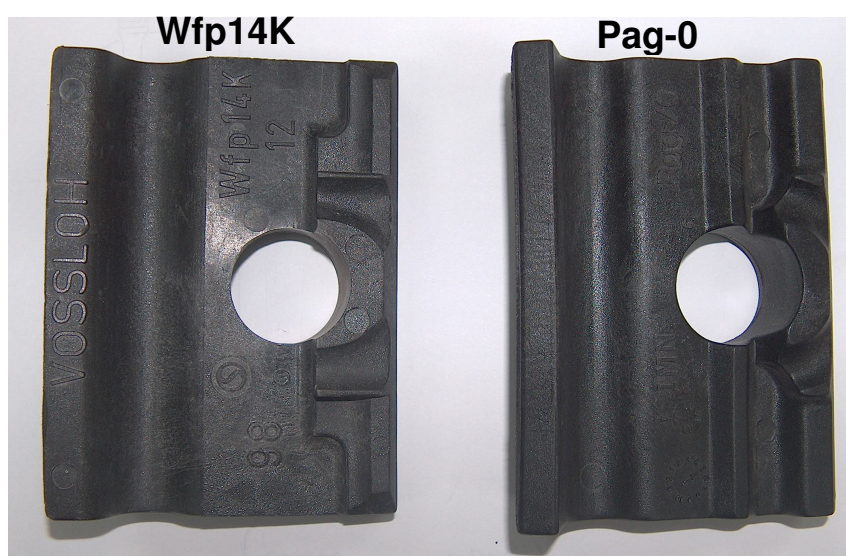


Figura 5.27. Diferencias entre la placa Wfp14K y la Pag-0

3.3. MODIFICACIONES DE LA TRAVIESA RESPECTO A LA LÍNEA MADRID-SEVILLA

La traviesa no es un componente de la sujeción, propiamente dicho, pero juega un papel muy importante en la misma ya que la vaina, uno de los componentes del anclaje, se posiciona embebida en el hormigón de la primera. Una de las etapas del proceso de fabricación consiste en la colocación de la vaina del anclaje, de forma que la traviesa terminada incluye las cuatro vainas embebidas en su posición definitiva. Por esta razón, a pesar de no formar parte del conjunto de sujeción, en este apartado se pretende reflejar las mejoras introducidas en las traviesas a emplear en el nuevo trazado.

La propuesta de modificación respecto a la traviesa AI-89 colocada en la línea Madrid-Sevilla (Figura 5.28) [86] parte de un aumento en el canto, en torno a 20 mm y un refuerzo de su armadura, a fin de poder incrementar su resistencia a esfuerzos dinámicos. Este modelo se ha denominado AI-99 (Figura 5.29). La traviesa a emplear en el nuevo trazado debe cumplir las especificaciones indicadas en el Pliego de bases para el suministro de traviesas [87].

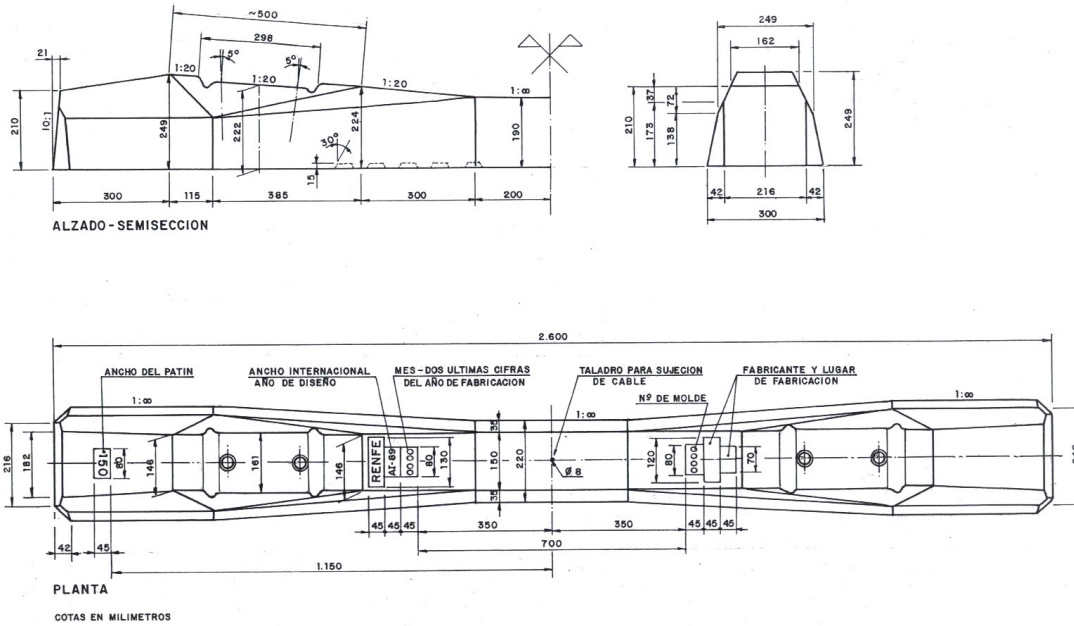


Figura 5.28. Traviesa AI-89 [86]

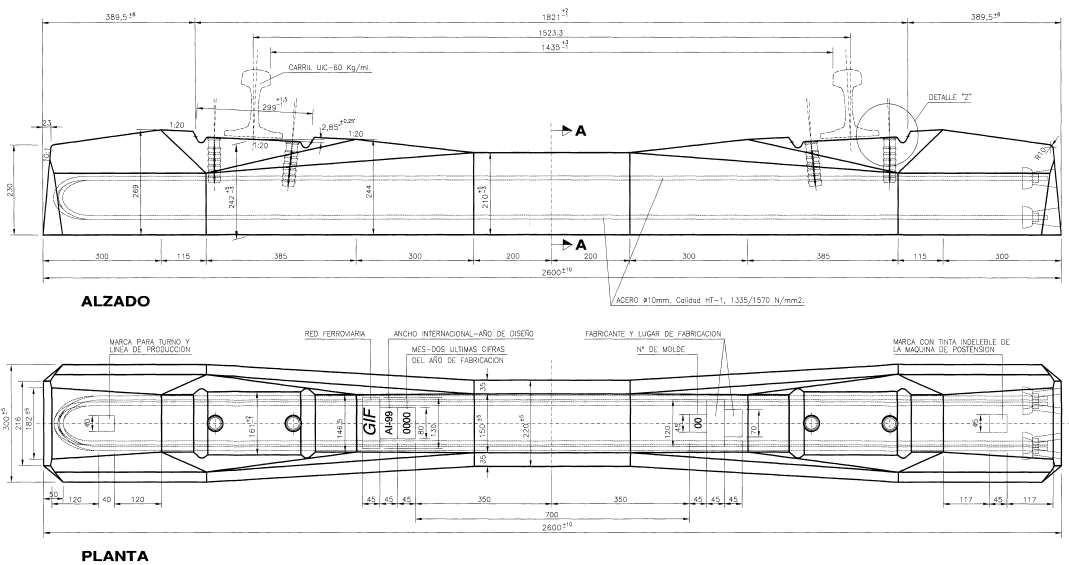


Figura 5.29. Traviesa AI-99 [88]

Los prototipos AI-99 suministrados por la totalidad de los fabricantes nacionales (codificados por las letras F, G, H, I, J y K) han sido contrastados física, mecánica y eléctricamente previamente a esta tesis por el Grupo de Materiales de la Universidad de Cantabria (LADICIM) para comprobar su adaptación a la Especificación Técnica [87].

Para comprobar la mejora mecánica que supone la traviesa AI-99 respecto a la AI-89 se realizaron varios ensayos contemplados en la Especificación Técnica [89-90], en concreto los ensayos realizados fueron los estáticos y dinámicos bajo carril.

La configuración para ambos ensayos se describe en la Figura 5.30, donde:

- 1: apoyo rígido
- 2: apoyo articulado
- 3: placa de apoyo elástica
- 4: placa de apoyo de carril estándar (placa de EVA)
- 5: apoyo regularizador
- 6: apoyo articulado

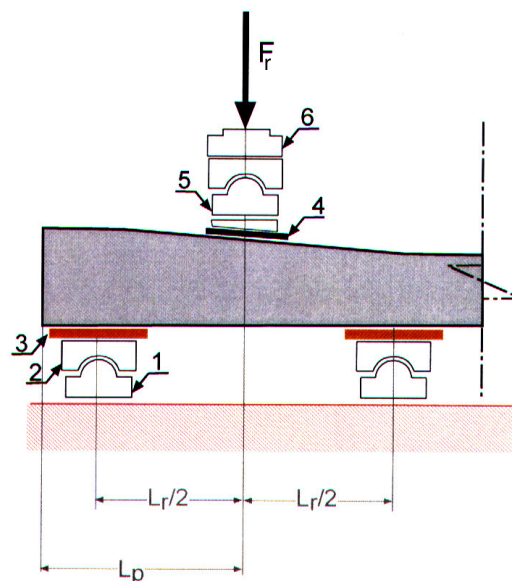


Figura 5.30. Configuración para los ensayos estáticos y dinámicos bajo carril [91]

El ensayo estático consiste en la aplicación de una carga Fr creciente y escalonada con los valores y velocidades indicados en la Figura 5.31, donde:

- Fr_0 : Fuerza inicial de carga para la sección bajo carril

$$Fr_0 = \frac{d_r}{L_r} \cdot Q_{r1} \quad (5.1)$$

- M_{d_r} : Momento de flexión positivo para la sección bajo carril
- L_r : Distancia entre apoyos estáticos (600 mm)
- F_{r_r} : Carga que produce la primera fisura en la fibra inferior de la sección bajo carril
- F_{r_B} : Carga de rotura para la sección bajo carril

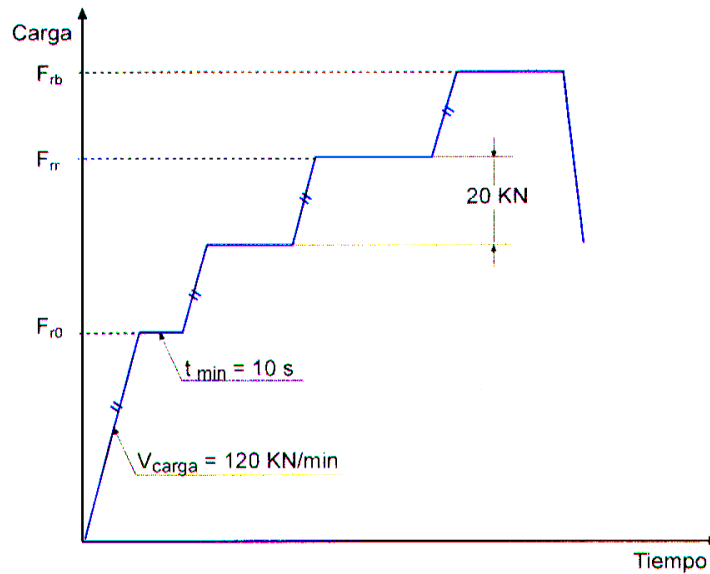


Figura 5.31. Desarrollo del ensayo estático

El ensayo dinámico consiste en la aplicación de trenes de ondas senoidales de 5000 ciclos cuyo valor máximo se va incrementando en 20 kN para cada tren mientras el valor mínimo se mantiene constante (50 kN) a una frecuencia comprendida entre 2 y 5 Hz. Los valores de carga, tiempos de espera y demás parámetros se indican en la Figura 5.32, donde:

- F_{r_u} : Carga mínima para la sección bajo carril en el ensayo dinámico (50 kN)
- $F_{r_{0.05}}$: Carga que produce una fisura remanente de 0,05 mm de abertura en la fibra inferior de la sección bajo carril.
- $F_{r_{0.5}}$: Carga que produce una fisura remanente de 0,5 mm de abertura en la fibra inferior de la sección bajo carril.

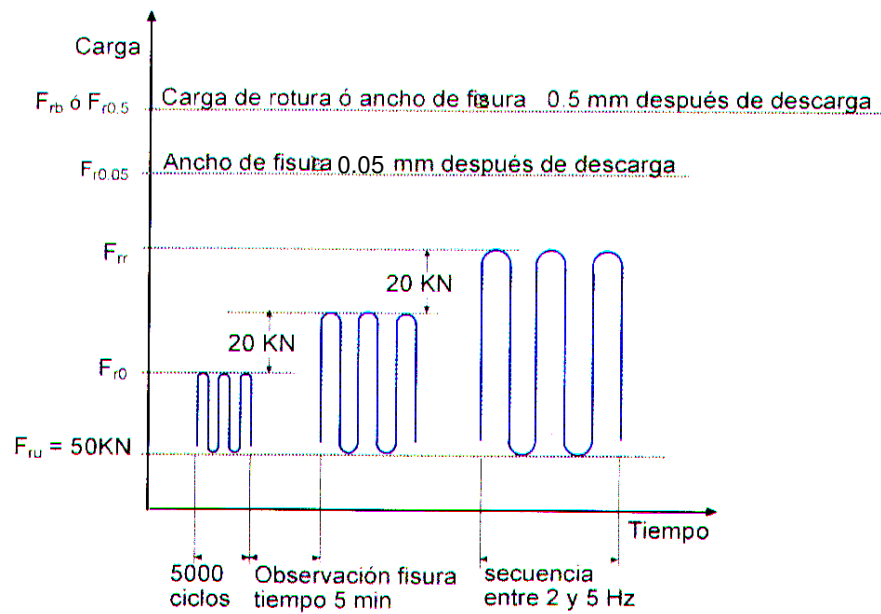


Figura 5.32. Desarrollo del ensayo dinámico

El dispositivo de ensayo para la realización del ensayo es el que se muestra en la Figura 5.33. La medición de las fisuras en la traviesa se realiza por medio de una cámara de video digital con un objetivo de 50 aumentos (Figura 5.34).

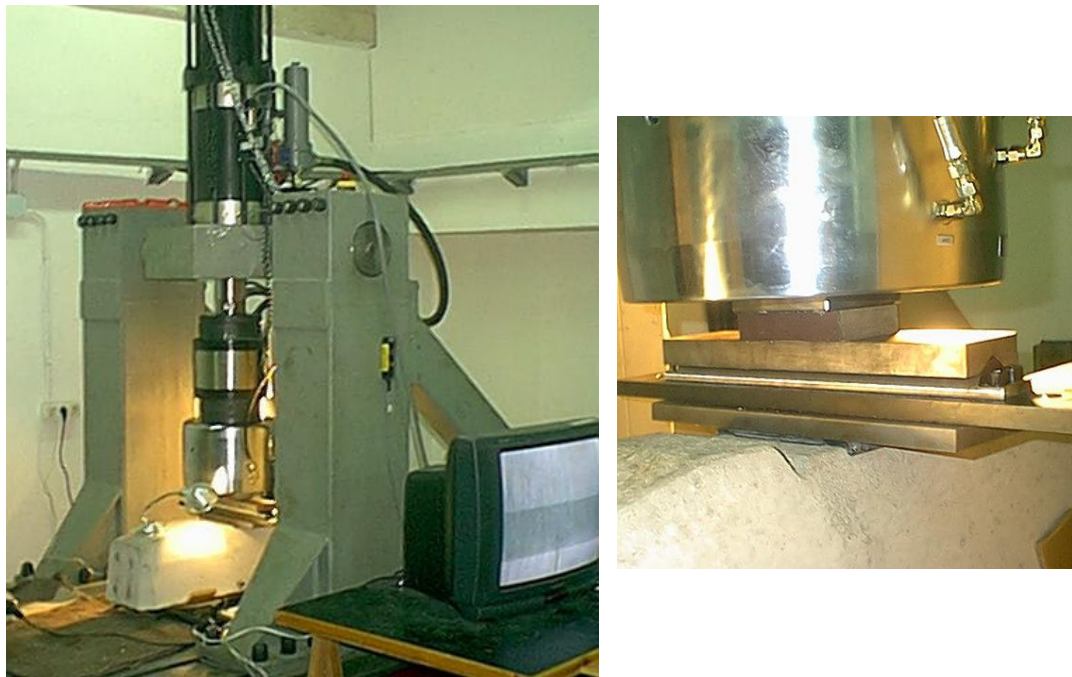


Figura 5.33. Dispositivo empleado para la realización del ensayo sobre traviesas



Figura 5.34. *Medición de las fisuras sobre la traviesa*

Se han llevado a cabo 6 ensayos estáticos en sección bajo carril y 2 dinámicos sobre cada uno de los modelos de traviesa, además de un control ponderal.

Los resultados obtenidos se muestran resumidos en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.35.

Tabla 5.2.- Resultados comparativos

Ensayo	AI-89	AI-99
Estático nº1	$Fr_r=192 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Estático nº2	$Fr_r=192 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Estático nº3	$Fr_r=212 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Estático nº4	$Fr_r=212 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Estático nº5	$Fr_r=212 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Estático nº6	$Fr_r=192 \text{ kN}$	$Fr_r=252 \text{ kN}$
Media est.	$Fr_r= 202\pm 10 \text{ kN}$	$Fr_r= 252 \text{ kN}$
Dinámico nº1	$Fr_{0.05}=272 \text{ kN}$ $Fr_b=292 \text{ kN}$	$Fr_{0.05}=332 \text{ kN}$ $Fr_b=372 \text{ kN}$
Dinámico nº2	$Fr_{0.05}=292 \text{ kN}$ $Fr_b=292 \text{ kN}$	$Fr_{0.05}=312 \text{ kN}$ $Fr_b=352 \text{ kN}$
Media din.	$Fr_{0.05}= 282\pm 10 \text{ kN}$ $Fr_b= 292 \text{ kN}$	$Fr_{0.05}= 322\pm 10 \text{ kN}$ $Fr_b= 362\pm 10 \text{ kN}$

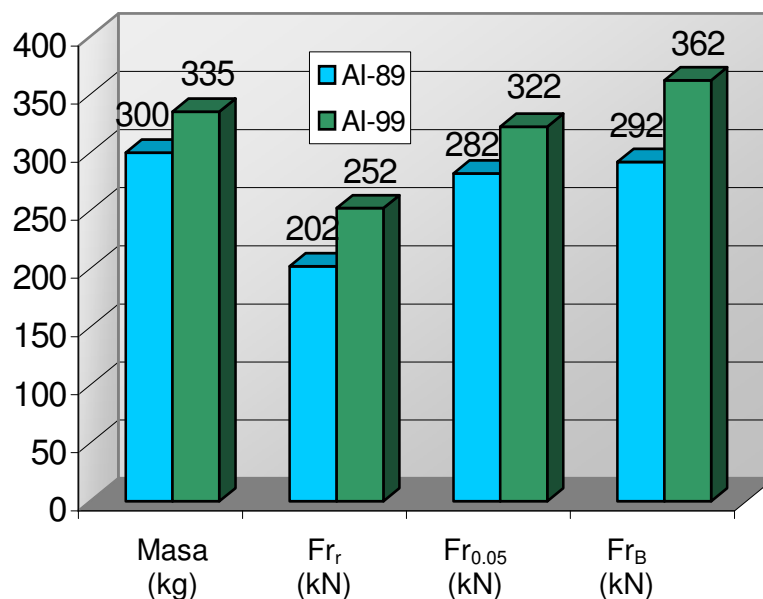


Figura 5.35. Resumen de resultados

Como puede observarse en los resultados recogidos en la Figura 5.35, las traviesas Al-99, cuyo incremento en peso es de 12 % respecto a sus predecesoras las Al-89, han conseguido un incremento del 25 %, aproximadamente, en la carga de rotura en sección bajo carril, tanto en estático, como en dinámico, así como, una mejora del 15 % en la carga de aparición de la fisura de 0.05 mm.

4. CARACTERIZACIÓN DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DE SUJECIÓN

En el apartado anterior se han presentado dentro de la sujeción HM (SKL-1) tres alternativas para el clip, cuatro para el anclaje, cuatro para la placa acodada y tres para la placa de asiento, situación, ésta, que genera un total de 144 configuraciones diferentes. Además, la sujeción SKL-14 podrá variar de anclaje y de placa de asiento, lo que implicaría otras 12 nuevas configuraciones. Analizar estos 156 conjuntos de sujeción se antoja imposible, por lo que el procedimiento seguido consistirá en ir analizando conjunto por conjunto, de forma que los resultados obtenidos con cada uno de ellos influya a la hora de configurar el

siguiente. Se trató de minimizar el número de configuraciones a ensayar, de tal forma, que se probaron todos los componentes y, que además, después el análisis, se puedan extraer conclusiones que ayuden a optimizar el conjunto de sujeción.

4.1. CONFIGURACIÓN N° 1

En la Tabla 5.3 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 1

Tabla 5.3.- Componentes de la configuración n° 1

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo C0, 7 mm, resaltes circulares, EVA.
Placa acodada	A2 (ligera), Fabricante A, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE, 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE, 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, Clip A
Traviesa	AI-99, Fabricante F
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con esta configuración son los siguientes:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 17.75 kN/ 17.58 kN/ 17.46 kN
 - Fuerza de apriete media: **17.60 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **69.76 kN/mm**
 - Comentario: El resultado no se sitúa dentro del intervalo fijado en la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$). Se trata de una placa demasiado flexible para las exigencias establecidas

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.4 aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 1.

Tabla 5.4.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 1

Prueba	Resultado	Comentario
F. Apriete prev.	17.6 kN	Resultado correcto
Rig. P_0/P_{0+75} prev	69.76 kN/mm	Valor inferior al establecido en la ET

Tras el resultado negativo obtenido en el ensayo de Rigidez Vertical Secante P_0/P_{0+75} , se decide parar la secuencia de ensayos y continuar con otra configuración distinta.

4.2. CONFIGURACIÓN Nº 2

En la Tabla 5.5 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 2,

Tabla 5.5.- Componentes de la configuración nº 2

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	Pag-0 (maciza), PA 6.6 + 35% FV
Espiga	sdü, PA 6.6 + 35 % FV
Tirafondo/Tornillo	Tirafondo SS-25, pavonado
Clip	SKL-1, clip B
Traviesa	AI-99, fabricante G
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con esta configuración son los siguientes [92]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^{o}/3^{er}$ ensayo): 17.14 kN/ 17.21 kN/ 17.07 kN
 - Fuerza de apriete media: **17.14 kN**

- Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **104.31 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **99.34 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^\circ/3^{er}/4^\circ$ ensayo): 9.16 kN/ 9.17 kN/ 9.21 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **9.18 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Rigidez vertical dinámica ($k_s \times 1.5$): 156.46 kN/mm
 - Angulo de montaje: 27.2°
 - $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{i}n}$: 77 kN/ 5 kN
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): **0.01 mm**
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): **0.81 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): **0.21 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): **0.18 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): **0.45 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): **0.38 mm**
 - Funcionalidad: **adecuada**
 - Pérdida de espesor en la parte exterior: **1.20 mm**
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores

indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 14.85 kN/ 15.00 kN/ 14.97 kN
 - Fuerza de apriete media: **14.85 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **13.36 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: **107.14 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **2.71 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
 - Resultado: **98.04 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **-1.30 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 9.75 kN/ 9.52 kN/ 8.52 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: **9.26 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **-0.87 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante 100/200 (K):
 - Resultado: **228.83 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 300 kN/mm

- Rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d):
 - Resultado: **158.23 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido en el intervalo válido para la especificación ($104.31 \leq k_d \leq 208.62$).

- Atenuación de impacto (a):
 - Def. media galga superior placa EVA (ϵ_{EVA}): -214.84 μd
 - Def. media galga superior placa 7 mm (ϵ_7): -136.96 μd
 - $a_{superior}$: 36.25 %
 - Def. media galga inferior placa EVA (ϵ_{EVA}): 184 μd
 - Def. media galga inferior placa 7 mm (ϵ_7): 119.63 μd
 - $a_{inferior}$: 35.10 %
 - atenuación: **35.67 %**
 - Comentario: la atenuación supera el valor del 25 % indicado en la especificación como cota inferior.

- Carga vertical (Q):
 - Carga de rotura: **131.87 kN**
 - Comentario: El anclaje superó la carga mantenida de 60 kN durante 3 minutos, tal como se indica en la especificación.

- Resistencia a la torsión (M):
 - Resultado ($1^{er}/2^o/3^{er}$ ensayo): 0.66 kN·m/ 1.04 kN·m / 2.48 kN·m
 - Resistencia a la torsión media: **1.40 kN·m**
 - Comentario: El momento aplicado para girar el carril 1º es superior a 0.75 kN·m, valor mínimo indicado en la especificación.

- Condiciones ambientales adversas:
 - Par de desapriete antes del ensayo: 161.4 N·m/ 163.2 N·m/ 160.1 N·m/ 159.7 N·m/ 147.2 N·m/ 144.0 N·m
 - Par medio de desapriete antes del ensayo: **155.9 N·m**
 - Par de desapriete después del ensayo: 169.0 N·m/ 173.2 N·m/ 166.0 N·m/ 167.2 N·m/ 148.8 N·m/ 144.8 N·m

- Par medio de desapriete después del ensayo: **161.5 N·m**
 - Comentario: Los elementos no metálicos no sufren deterioro visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondo 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 metálicos como el patín del carril, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector. A continuación, se comprueba la correcta funcionalidad del sistema en un nuevo montaje del conjunto.
- Resistencia eléctrica (R):
- R_{\min} (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 10.30 kΩ/ 7.14 kΩ/ 10.06 kΩ
 - R_{\min} media: 9.16 kΩ
 - C_a : 36.5 mS/m
 - K_a : 1.095
 - R: **10.03 kΩ**
 - Comentario: La resistencia eléctrica entre los dos hilos superó el valor de 5 kΩ, valor mínimo establecido por la especificación.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

Un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 2 aparece en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 2

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=17.14$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0+75 prev.	$k_s= 104.31$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=99.34$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz. prev.	$F=9.18$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada	$D_{\max}^c=0.01$; $D_{\min}^c=0.81$ $D_{\max}^{pv}=0.21$; $D_{\min}^{pv}=0.18$ $D_{\max}^{ph}=0.45$; $D_{\min}^{ph}=0.38$ Pérdida espesor=1.20 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=14.85$ kN (13.36 %)	Resultado correcto

Prueba	Resultado	Comentario
Rig. P_0+75 post.	$k'_s=107.14$ (2.71 %)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$K'=98.04$ (-1.30 %)	Resultado correcto
R. desliz. post.	$F'=9.26$ kN (-0.87 %)	Resultado correcto
Rig. 100/200	$K=228.83$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. dinámica	$k_d=158.23$ kN/mm	Resultado correcto
Atenuación imp.	$a=35.67$ %	Resultado correcto
Carga vertical	$Q_{max}= 131.87$ kN	Resultado correcto
Resist. torsión	$M=1.40$ kN·m	Resultado correcto
Cond. adversas	Desap. prev: 155.9 N·m Desap. post: 161.5 N·m	Resultado correcto
Resist. eléctrica	$R=10.03$ k Ω	Resultado correcto

4.3. CONFIGURACIÓN N° 3

En la Tabla 5.7 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 3.

Tabla 5.7.- Componentes de la configuración n° 3

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, HYTREL
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante A, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 35 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante F
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con la configuración n° 3 son los siguientes [93]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 17.11 kN/ 17.36 kN/ 17.37 kN
 - Fuerza de apriete media: **17.28 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **105.66 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **103.45 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^\circ/3^{er}/4^\circ$ ensayo): 10.0 kN/ 10.0 kN/ 10.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **10.0 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Rigidez vertical dinámica ($k_s \times 1.5$): 158.5 kN/mm
 - Angulo de montaje: 27.2°
 - $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{i}n}$: 77.3 kN/ 5 kN
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): **0.57 mm**
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): **0.93 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): **0.08 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): **0.14 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): **0.33 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): **0.39 mm**
 - Funcionalidad: **adecuada**
 - Pérdida de espesor en la parte exterior: **1.10 mm**
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- ❑ Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 16.29 kN/ 16.34 kN/ 16.34 kN
 - Fuerza de apriete media: **16.32 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **5.55 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- ❑ Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: **113.89 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **7.79 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- ❑ Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
 - Resultado: **108.33 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **4.71 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- ❑ Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 10.0 kN/ 10.0 kN/ 10.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: **10.0 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **0 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- ❑ Rigidez vertical secante 100/200 (K):
 - Resultado: **240.5 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 300 kN/mm

- ❑ Rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d):
 - Resultado: **141.69 kN/mm**

- Comentario: El resultado está comprendido en el intervalo válido para la especificación ($105.66 \leq k_d \leq 211.32$).
- Atenuación de impacto (a):
- Def. media galga superior placa EVA (ϵ_{EVA}): $-53.30 \mu d$
 - Def. media galga superior placa 7 mm (ϵ_7): $-39.47 \mu d$
 - $a_{superior}$: 25.95 %
 - Def. media galga inferior placa EVA (ϵ_{EVA}): $51.67 \mu d$
 - Def. media galga inferior placa 7 mm (ϵ_7): $38.25 \mu d$
 - $a_{inferior}$: 25.97 %
 - atenuación: **25.96 %**
 - Comentario: la atenuación supera el valor del 25 % indicado en la especificación como cota inferior.
- Carga vertical (Q):
- Carga de rotura: **87.67 kN**
 - Comentario: El anclaje superó la carga mantenida de 60 kN durante 3 minutos, tal como se indica en la especificación.
- Resistencia a la torsión (M):
- Resultado ($1^{er}/2^o/3^{er}$ ensayo): 1.02 kN·m / 1.78 kN·m / 3.00 kN·m
 - Resistencia a la torsión media: **1.93 kN·m**
 - Comentario: El momento aplicado para girar el carril 1º es superior a 0.75 kN·m, valor mínimo indicado en la especificación.
- Condiciones ambientales adversas:
- Par de desapriete antes del ensayo: 230.0 N·m / 220.0 N·m / 210.0 N·m / 225.0 N·m / 217.0 N·m / 226.0 N·m
 - Par medio de desapriete antes del ensayo: **221.3 N·m**
 - Par de desapriete después del ensayo: 224.8 N·m / 210.8 N·m / 208.4 N·m / 198.0 N·m / 202.0 N·m / 222.8 N·m
 - Par medio de desapriete después del ensayo: **211.1 N·m**

- Comentario: Los elementos no metálicos no sufren deterioro visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondo 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, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector. A continuación, se comprueba la correcta funcionalidad del sistema en un nuevo montaje del conjunto.

□ Resistencia eléctrica (R):

- R_{\min} (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 1.19 k Ω / 1.34 k Ω / 1.16 k Ω
- R_{\min} media: 1.23 k Ω
- C_a : 36.5 mS/m
- K_a : 1.095
- R: **1.34 k Ω**
- Comentario: La resistencia eléctrica entre los dos hilos es inferior a 5 k Ω , valor mínimo establecido por la especificación.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.8 aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 3.

Tabla 5.8.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 3

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=17.28$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0+75 prev.	$k_s=105.66$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=103.45$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz. prev.	$F=10.0$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada	$D_{\max}^c=0.57$; $D_{\min}^c=0.93$ $D_{\max}^{pv}=0.08$; $D_{\min}^{pv}=0.14$ $D_{\max}^{ph}=0.33$; $D_{\min}^{ph}=0.39$ Pérdida de espesor: 1.10 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=16.32$ kN (5.55 %)	Resultado correcto
Rig. P_0+75 post.	$k'_s=113.89$ (7.79 %)	Resultado correcto

Prueba	Resultado	Comentario
Rig. 80 post.	$k'=108.33$ (4.71 %)	Resultado correcto
R. desliz. post.	$F'=10.0^*$ kN (0 %)	Resultado correcto
Rig. 100/200	$K=240.5$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. dinámica	$k_d=141.69$ kN/mm	Resultado correcto
Atenuación imp.	$a=25.96$ %	Resultado correcto
Carga vertical	$Q_{max}= 87.67$ kN	Resultado correcto
Resist. torsión	$M=1.93$ kN·m	Resultado correcto
Cond. adversas	Desap. prev: 221.3 N·m Desap. post: 211.1 N·m	Resultado correcto
Resist. eléctrica	$R=1.34$ k Ω	Resultado incorrecto

4.4. CONFIGURACIÓN N° 4

En la Tabla 5.9 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 4.

Tabla 5.9.- Componentes de la configuración n° 4

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, HYTREL
Placa acodada	Híbrida, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE, 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE, 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip C
Traviesa	AI-99, fabricante H
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración n° 4 son los siguientes [94]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 19.40 kN/ 19.31 kN/ 19.24 kN
 - Fuerza de apriete media: **19.31 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **107.91 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **101.59 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^\circ/3^{er}/4^\circ$ ensayo): 9.94 kN/ 11.62 kN/ 12.35 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **11.30 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Rigidez vertical dinámica ($k_s \times 1.5$): 161.86 kN/mm
 - Angulo de montaje: 27.25°
 - $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{i}n}$: 77.5 kN/ 5 kN
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): **0.70 mm**
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): **0.86 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): **0.11 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): **0.21 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): **0.32 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): **0.35 mm**
 - Funcionalidad: **adecuada**
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: **0.90 mm**
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 17.41 kN/ 17.85 kN/ 17.81 kN
 - Fuerza de apriete media: **17.69 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **8.39 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: **109.21 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **1.20 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
 - Resultado: **93.00 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **-9.23 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 11.17 kN/ 12.38 kN/ 12.45 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: **12.0 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **-6.19 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante 100/200 (K):
 - Resultado: **276.24 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 300 kN/mm

- Rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d):
 - Resultado: **149.18 kN/mm**

- Comentario: El resultado está comprendido en el intervalo válido para la especificación ($107.91 \leq k_d \leq 215.82$).
- Atenuación de impacto (a):
- Def. media galga superior placa EVA (ϵ_{EVA}): -229.02 μd
 - Def. media galga superior placa 7 mm (ϵ_7): -167.48 μd
 - a_{superior} : 26.87 %
 - Def. media galga inferior placa EVA (ϵ_{EVA}): 199.22 μd
 - Def. media galga inferior placa 7 mm (ϵ_7): 148.44 μd
 - a_{inferior} : 25.49 %
 - atenuación: **26.18 %**
 - Comentario: la atenuación supera el valor del 25 % indicado en la especificación como cota inferior.
- Carga vertical (Q):
- Carga de rotura: **92.55 kN**
 - Comentario: El anclaje superó la carga mantenida de 60 kN durante 3 minutos, tal como se indica en la especificación.
- Resistencia a la torsión (M):
- Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 0.55 kN·m/ 1.64 kN·m / 3.26 kN·m
 - Resistencia a la torsión media: **1.82 kN·m**
 - Comentario: El momento aplicado para girar el carril 1^o es superior a 0.75 kN·m, valor mínimo indicado en la especificación.
- Condiciones ambientales adversas:
- Par de desapriete antes del ensayo: 191.0 N·m/ 202.0 N·m/ 174.0 N·m/ 210.0 N·m/ 181.0 N·m/ 176.0 N·m
 - Par medio de desapriete antes del ensayo: **189.0 N·m**
 - Variación respecto al par nominal (250 N·m): **24.4 %**
 - Par de desapriete después del ensayo: 181.6 N·m/ 202.8 N·m/ 211.6 N·m/ 222.8 N·m/ 213.6 N·m/ 187.2 N·m
 - Par medio de desapriete después del ensayo: **203.3 N·m**

- Comentario: Los elementos no metálicos no sufren deterioro visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondo 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, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector. A continuación, se comprueba la correcta funcionalidad del sistema en un nuevo montaje del conjunto.
- Resistencia Eléctrica (R):
- R_{\min} (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 12.8 kΩ/ 12.6 kΩ/ 11.9 kΩ
 - R_{\min} media: 12.4 kΩ
 - C_a : 36.5 mS/m
 - K_a : 1.095
 - R: **13.57 kΩ**
 - Comentario: La resistencia eléctrica entre los dos hilos superó el valor de 5 kΩ, valor mínimo establecido por la especificación.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

Un resumen de los resultados obtenidos con la configuración n° 4 aparece en la Tabla 5.10

Tabla 5.10.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración n° 4

Prueba	Resultado	Comentario
F. Apriete prev.	$P_0=19.31$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0+75 prev	$k_s=107.91$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev	$k=101.59$ kN/mm	Resultado correcto
R. Desliz prev.	$F=11.30$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada	$D_{\max}^c=0.70$; $D_{\min}^c=0.86$ $D_{\max}^{pv}=0.11$; $D_{\min}^{pv}=0.21$ $D_{\max}^{ph}=0.32$; $D_{\min}^{ph}=0.35$ Pérdida de espesor: 0.90 mm	Resultado correcto
F. Apriete post.	$P'_0=17.69$ kN (8.39 %)	Resultado correcto
Rig. P_0+75 post	$k'_s=109.21$ (1.20 %)	Resultado correcto

Prueba	Resultado	Comentario
Rig. 80 post	$k'=93.00$ (-9.23 %)	Resultado correcto
R. Desliz post.	$F'=12.0$ kN (-6.19 %)	Resultado correcto
Rig. 100/200	$K=276.24$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. dinámica	$k_d=149.18$ kN/mm	Resultado correcto
Atenuación imp.	$a=26.18$ %	Resultado correcto
Carga Vertical	$Q_{max}= 92.55$ kN	Resultado correcto
Resist. torsión	$M=1.82$ kN·m	Resultado correcto
Cond. adversas	Desap. prev: 189 N·m Desap. post: 203.3 N·m	Resultado correcto
Resist. eléctrica	$R=13.57$ k Ω	Resultado correcto

4.5. CONFIGURACIÓN N° 5

En la Tabla 5.11 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 5.

Tabla 5.11.- Componentes de la configuración n° 5

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo C1; 7 mm, resaltes circulares, EVA
Placa acodada	Pag-0 (maciza), PA 6 + 30% FV
Espiga	sdü, Polietileno
Tirafondo/Tornillo	Tirafondo SS-25, pavonado
Clip	SKL-1, clip C
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración n° 5 son los siguientes:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 15.7 kN/ 15.3 kN/ 15.3 kN
 - Fuerza de apriete media: **15.43 kN**
 - Comentario: El valor obtenido no supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

La gráfica obtenida en el ensayo se muestra en el ANEXO I.

En la Tabla 5.12 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 5.

Tabla 5.12.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 5

Prueba	Resultado	Comentario
F. Apriete prev.	$P_0=15.43$ kN	Resultado incorrecto

Tras el resultado negativo obtenido en el ensayo de Fuerza de Apriete, se decide parar la secuencia de ensayos y continuar con otra configuración distinta.

4.6. CONFIGURACIÓN Nº 6

En la Tabla 5.13 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 6.

Tabla 5.13.- Componentes de la configuración nº 6

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo C1; 7 mm, resaltes circulares, EVA
Placa acodada	Pag-0 (maciza), PA 6 + 30% FV
Espiga	GS, PA 6.6 + 35 % FV
Tirafondo/Tornillo	GS, galvanizado (con y sin arandela)
Clip	SKL-1, clip C
Traviesa	AI-99, fabricante J
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración nº 6 son los siguientes:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0) empleando tirafondo sin arandela:
 - Resultado ($1^{er}/2^o/3^{er}$ ensayo): 15.07 kN/ 15.15 kN/ 15.09 kN
 - Fuerza de apriete media: **15.10 kN**

- Comentario: El valor obtenido no supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

En vista del resultado se decide repetir el ensayo empleando, en este caso, el tirafondo con arandela.

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0) empleando tirafondo con arandela:
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 16.47 kN/ 16.47 kN/ 16.40 kN
 - Fuerza de apriete media: **16.44 kN**
 - Comentario: El valor obtenido no supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.14 aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 6

Tabla 5.14.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 6

Prueba	Resultado	Comentario
F. Apriete sin arandela	$P_0=15.10$ kN	Resultado incorrecto
F. Apriete con arandela	$P_0=16.44$ kN	Resultado incorrecto

Tras los dos resultados negativos obtenidos en los ensayos de Fuerza de Apriete, se decide parar la secuencia de ensayos y continuar con otra configuración distinta.

4.7. CONFIGURACIÓN Nº 7

En la Tabla 5.15 se enumeran los elementos empleados en la configuración nº 7.

Tabla 5.15.- Componentes de la configuración nº 7

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo C1; 7 mm, resaltes circulares, EVA
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE, SV 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE, SV 2-115-5 , galvanizado
Clip	SKL-1, clip C
Traviesa	AI-99, fabricante J
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración nº 7 son los siguientes [95]:

- ❑ Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^{o}/3^{er}$ ensayo): 17.77 kN/ 17.73 kN/ 17.70 kN
 - Fuerza de apriete media: **17.73 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- ❑ Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **92.33 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- ❑ Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **93.28 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- ❑ Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado ($2^{o}/3^{er}/4^{o}$ ensayo): 12.1 kN/ 12.4 kN/ 12.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **12.3 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Rigidez vertical dinámica ($k_s \times 1.5$): 138.5 kN/mm
 - Angulo de montaje: 26.8°
 - $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{i}n}$: 75.22 kN/ 5 kN
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): **0.88 mm**
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): **0.98 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): **0.27 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): **0.38 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): **0.34 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): **0.43 mm**
 - Funcionalidad: **adecuada**
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: **promedio de 1.2 mm y máximo de 1.7 mm**
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. En la placa de asiento se produjo un desgaste muy acusado y heterogéneo, alcanzando un espesor promedio de 1.2 mm y llegando hasta 1.7 mm en las zonas más desfavorables donde se detectaron desgastes localizados. La funcionalidad, pese a ello, es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado ($1^{er}/2^o/3^{er}$ ensayo): 16.7 kN/ 16.59 kN/ 16.37 kN
 - Fuerza de apriete media: **16.55 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **6.65 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: **114.36 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **23.86 %**

- Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.
- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
- Resultado: **104.97 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **12.53 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.
- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
- Resultado ($2^{\circ}/3^{\text{er}}/4^{\circ}$ ensayo): 12.49 kN/ 11.03 kN/ 12.34 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: **11.95 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **3.08 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.
- Rigidez vertical secante 100/200 (K):
- Resultado: **122.67 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 300 kN/mm
- Rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d):
- Resultado: **182.84 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido en el intervalo válido para la especificación, aunque muy cerca del límite superior ($92.34 \leq k_d \leq 184.67$).
- Atenuación de impacto (a):
- Def. media galga superior placa EVA (ϵ_{EVA}): -234.4 μd
 - Def. media galga superior placa 7 mm (ϵ_7): -176.4 μd
 - a_{superior} : 24.58 %
 - Def. media galga inferior placa EVA (ϵ_{EVA}): 183.1 μd

- Def. media galga inferior placa 7 mm (ϵ_7): 141.6 μ d
 - $a_{inferior}$: 22.66 %
 - atenuación: **23.62 %**
 - Comentario: la atenuación no supera el valor del 25 % indicado en la especificación como cota inferior.
- Carga vertical (Q):
- Carga de rotura: **75.53 kN**
 - Comentario: El anclaje superó la carga mantenida de 60 kN durante 3 minutos, tal como se indica en la especificación.
- Resistencia a la torsión (M):
- Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 0.67 kN·m/ 1.08 kN·m / 1.32 kN·m
 - Resistencia a la torsión media: **1.02 kN·m**
 - Comentario: El momento aplicado para girar el carril 1^º es superior a 0.75 kN·m, valor mínimo indicado en la especificación.
- Condiciones ambientales adversas:
- Par de desapriete antes del ensayo: 186.0 N·m/ 185.2 N·m/ 175.6 N·m/ 205.2 N·m/ 164.0 N·m/ 176.8 N·m
 - Par medio de desapriete antes del ensayo: **182.1 N·m**
 - Par de desapriete después del ensayo: 141.6 N·m/ 189.6 N·m/ 186.8 N·m/ 208.8 N·m/ 172.0 N·m/ 183.2 N·m
 - Par medio de desapriete después del ensayo: **180.3 N·m**
 - Comentario: Los elementos no metálicos no sufren deterioro visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondo 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, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector. A continuación, se comprueba la correcta funcionalidad del sistema en un nuevo montaje del conjunto.

□ Resistencia eléctrica (R):

- R_{\min} (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 28.57 k Ω / 13.25 k Ω / 19.77 k Ω
- R_{\min} media: 20.53 k Ω
- C_a : 36.5 mS/m
- K_a : 1.095
- R: **22.48 k Ω**
- Comentario: La resistencia eléctrica entre los dos hilos superó el valor de 5 k Ω , valor mínimo establecido por la especificación.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.16 aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración n^o 7

Tabla 5.16.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración n^o 7

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=17.73$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0+75 prev.	$k_s= 92.35$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=93.28$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz. prev.	$F=12.33$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada	$D_{\max}^c=0.88$; $D_{\min}^c=0.98$ $D_{\max}^{pv}=0.27$; $D_{\min}^{pv}=0.38$ $D_{\max}^{ph}=0.34$; $D_{\min}^{ph}=0.43$ Pérdida de espesor: 1.2-1.7 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=16.55$ kN (6.65%)	Resultado correcto
Rig. P_0+75 post	$k'_s=114.36$ (23.86%)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$k'=104.97$ (12.53 %)	Resultado correcto
R. desliz. post.	$F'=11.95$ kN (3.08 %)	Resultado correcto
Rig. 100/200	$K=122.67$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. dinámica	$k_d=182.84$ kN/mm	Resultado correcto
Atenuación imp.	$a=23.62$ %	Resultado incorrecto
Carga vertical	$Q_{\max}= 75.53$ kN	Resultado correcto
Resist. torsión	$M=1.02$ kN·m	Resultado correcto
Cond. adversas	Desap. prev: 182.1 N·m Desap. post: 180.3 N·m	Resultado correcto
Resist. eléctrica	$R=22.48$ k Ω	Resultado correcto

4.8. CONFIGURACIÓN N° 8

En la Tabla 5.17 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 8.

Tabla 5.17.- Componentes de la configuración n° 8

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	Pag-0 (maciza), PA 6 + 30% FV (*)
Espiga	GS, PA 6.6 + 35 % FV
Tirafondo/Tornillo	GS, galvanizado
Clip	SKL-1, clip B
Traviesa	Al-99, fabricante K
Carril	UIC-60

(*) La placa acodada se rectificó para conseguir una altura de 19.5 mm en la zona donde se aloja el clip metálico.

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración n° 8 son los siguientes [96]:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 18.33 kN/ 18.33 kN/ 18.29 kN
 - Fuerza de apriete meia: **18.31 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **91.54 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **88.27 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado (2^o/3^{er}/4^o ensayo): 10.0 kN/ 10.0 kN/ 10.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **10.0 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

- Dinámico de carga inclinada:
 - Rigidez vertical dinámica ($k_s \times 1.5$): 137.31 kN/mm
 - Angulo de montaje: 26.8°
 - $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{i}n}$: 75.08 kN/ 5 kN
 - Desplazamiento de cabeza tras el ensayo para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^c_{m\acute{a}x}$): **0.59mm**
 - Desplazamiento de cabeza para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^c_{m\acute{i}n}$): **0.94 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{pv}_{m\acute{a}x}$): **0.22 mm**
 - Desplazamiento vertical del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{pv}_{m\acute{i}n}$): **0.28 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{a}x}$ ($D^{ph}_{m\acute{a}x}$): **0.22 mm**
 - Desplazamiento horizontal del patín para $F_{m\acute{i}n}$ ($D^{ph}_{m\acute{i}n}$): **0.35 mm**
 - Funcionalidad: **adecuada**
 - Pérdida de espesor en la zona exterior: **0.80 mm**
 - Comentario: Los desplazamientos de cabeza son inferiores a 1 mm, mientras que los del patín no superan los 0.5 mm, cotas superiores indicadas en la especificación. La funcionalidad es adecuada tras finalizar el ensayo.

- Fuerza de apriete, posterior al dinámico (P'_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 16.23 kN/ 16.04 kN/ 16.07 kN
 - Fuerza de apriete media: **16.10 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **12.05 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %. También se puede observar como la pérdida de fuerza de apriete es prácticamente independiente del método con que se determine.

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , posterior al dinámico (k'_s):
 - Resultado: **98.72 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **7.84 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Rigidez vertical a 80 kN, posterior al dinámico (k'):
 - Resultado: **90.37 kN/mm**
 - Aumento respecto al resultado original: **2.37 %**
 - Comentario: El aumento tras el ensayo dinámico es inferior al máximo permitido por la especificación del 25 %.

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, posterior al dinámico (F):
 - Resultado ($2^{\circ}/3^{\text{er}}/4^{\circ}$ ensayo): 10.0 kN/ 10.0 kN/ 10.0 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal medio: **10.0 kN**
 - Pérdida respecto al resultado original: **0 %**
 - Comentario: La pérdida tras el ensayo dinámico es inferior a la máxima permitida por la especificación del 20 %.

- Rigidez vertical secante 100/200 (K):
 - Resultado: **251.0 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 300 kN/mm

- Rigidez dinámica a baja frecuencia (k_d):
 - Resultado: **143.1 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido en el intervalo válido para la especificación ($91.54 \leq k_d \leq 183.08$).

- Atenuación de impacto (a):
 - Def. media galga superior placa EVA (ϵ_{EVA}): -340 μd
 - Def. media galga superior placa 7 mm (ϵ_7): -288 μd
 - a_{superior} : 15.21 %
 - Def. media galga inferior placa EVA (ϵ_{EVA}): 318 μd

- Def. media galga inferior placa 7 mm (ϵ_7): 266 μ d
 - $a_{inferior}$: 16.79 %
 - atenuación: **16.00 %**
 - Comentario: la atenuación no supera el valor del 25 % indicado en la especificación como cota inferior.
- Carga vertical (Q):
- Carga de rotura: a **105.8 kN** se rompe la espiga, llegando posteriormente hasta 113.4 kN, momento en el que se produce la rotura del tirafondo.
 - Comentario: El anclaje superó la carga mantenida de 60 kN durante 3 minutos, tal como se indica en la especificación.
- Resistencia a la torsión (M):
- Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 0.67 kN·m/ 1.94 kN·m / 3.33 kN·m
 - Resistencia a la torsión media: **1.98 kN·m**
 - Comentario: El momento aplicado para girar el carril 1^o es superior a 0.75 kN·m, valor mínimo indicado en la especificación.
- Condiciones ambientales adversas:
- Par de desapriete antes del ensayo: 146.4 N·m/ 128.0 N·m/ 156.4 N·m/ 141.2 N·m/ 136.0 N·m/ 136.8 N·m
 - Par medio de desapriete antes del ensayo: **140.8 N·m**
 - Par de desapriete después del ensayo: 178.4 N·m/ 135.6 N·m/ 130 N·m/ 158.4 N·m/ 154.8 N·m/ 130.0 N·m
 - Par medio de desapriete después del ensayo: **147.9 N·m**
 - Comentario: Los elementos no metálicos no sufren deterioro visible alguno. Sin embargo, en los elementos metálicos, tirafondo 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, debido al desgaste por rozamiento del recubrimiento protector. A continuación, se comprueba la correcta funcionalidad del sistema en un nuevo montaje del conjunto.

- Resistencia eléctrica (R):
 - R_{\min} (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 6.17 k Ω / 4.43 k Ω / 3.78 k Ω
 - R_{\min} media: 4.79 k Ω
 - C_a : 36.5 mS/m
 - K_a : 1.095
 - R: **5.25 k Ω**
 - Comentario: La resistencia eléctrica entre los dos hilos superó el valor de 5 k Ω , valor mínimo establecido por la especificación.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.18 aparecen un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 8.

Tabla 5.18.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 8

Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=18.31$ kN	Resultado correcto
Rig. P_0+75 prev.	$k_s=91.54$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=88.27$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz. prev.	$F=10.0$ kN	Resultado correcto
Dinámico de carga inclinada	$D_{\max}^c=0.59$; $D_{\min}^c=0.94$ $D_{\max}^{pv}=0.22$; $D_{\min}^{pv}=0.28$ $D_{\max}^{ph}=0.22$; $D_{\min}^{ph}=0.35$ Pérdida de espesor: 0.80 mm	Resultado correcto
F. apriete post.	$P'_0=16.10$ kN (12.05 %)	Resultado correcto
Rig. P_0+75 post.	$k'_s=98.72$ (7.84%)	Resultado correcto
Rig. 80 post.	$k'=90.37$ (2.38 %)	Resultado correcto
R. desliz post.	$F'=10.0$ kN (0 %)	Resultado correcto
Rig. 100/200	$K=251.0$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. dinámica	$k_d=143.05$ kN/mm	Resultado correcto
Atenuación imp.	$a=16.00$ %	Resultado incorrecto
Carga vertical	$Q_{\max}=105.0-113.4$ kN	Resultado correcto
Resist. torsión	$M=1.98$ kN·m	Resultado correcto
Cond. adversas	Desap. prev: 140.8 N·m Desap. post: 147.8 N·m	Resultado correcto
Resist. eléctrica	$R=5.25$ k Ω	Resultado correcto

4.9. CONFIGURACIÓN N° 9

En la Tabla 5.19 se enumeran los elementos empleados en la configuración n° 9.

Tabla 5.19.- Componentes de la configuración n° 9

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, HYTREL
Placa acodada	Wfp 14 K (maciza), PA 6.6 + 35% FV
Espiga	Sdü 21, Polietileno
Tirafondo/Tornillo	Tirafondo n° 9, pavonado
Clip	SKL-14
Traviesa	AI-99, fabricante L
Carril	UIC-60

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la configuración n° 9 son los siguientes:

- Fuerza de apriete, previo al dinámico (P_0):
 - Resultado (1^{er}/2^o/3^{er} ensayo): 16.45 kN/ 16.27 kN/ 16.12 kN
 - Fuerza de apriete media: **16.28 kN**
 - Comentario: El valor obtenido no supera el mínimo exigido por la especificación de 17 kN

- Rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} , previo al dinámico (k_s):
 - Resultado: **117.64 kN/mm**
 - Comentario: El resultado está comprendido dentro del intervalo fijado por la especificación ($80 \leq k_s \leq 125$)

- Rigidez vertical a 80 kN, previo al dinámico (k):
 - Resultado: **116.73 kN/mm**
 - Comentario: El resultado es inferior al máximo exigido por la especificación de 150 kN/mm

- Resistencia al deslizamiento longitudinal, previo al dinámico (F):
 - Resultado (2º/3º/4º ensayo): 7.5 kN/ 7.5 kN/ 7.5 kN
 - Resistencia al deslizamiento longitudinal media: **7.5 kN**
 - Comentario: El valor obtenido supera el mínimo exigido por la especificación de 9 kN

Tras el resultado negativo obtenido en el ensayo de Resistencia al deslizamiento longitudinal, se decide parar la secuencia de ensayos.

Las gráficas obtenidas en los diferentes ensayos se muestran en el ANEXO I.

En la Tabla 5.20 aparece un resumen de los resultados obtenidos con la configuración nº 9

Tabla 5.20.- Resumen de resultados obtenidos con la configuración nº 9


Prueba	Resultado	Comentario
F. apriete prev.	$P_0=16.28$ kN	Resultado incorrecto
Rig. P_0+75 prev.	$k_s=117.64$ kN/mm	Resultado correcto
Rig. 80 prev.	$k=116.73$ kN/mm	Resultado correcto
R. desliz prev.	$F=7.5$ kN	Resultado incorrecto


4.10. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES

En la Tabla 5.21 se presenta, a modo de resumen, tanto los componentes de cada una de las configuraciones, como los ensayos realizados, indicando cuales han sido superados (verde) y cuales no (rojo).

Tabla 5.21.- Resumen de resultados

Config.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Componentes	Anclaje	VAPE	SDÜ PA66	VAPE	VAPE	SDÜ PE	GS TRA	VAPE	GS TRA	SDÜ PE
	Placa asiento	Mod. C0	Mod. A	Mod. B	Mod. B	Mod. C1	Mod. C1	Mod. C1	Mod. A	Mod. B
	Placa acodada	A2 Fb. A	Pag-0 PA66	A2 Fb. A	HIBR	Pag-0	Pag-0	A2 Fb. B	Pag-0 MODIF	Wfp1 4K
	Clip	SKL 1 Clip A	SKL 1 Clip B	SKL 1 Clip A	SKL 1 Clip B	SKL 1 Clip C	SKL 1 Clip C	SKL 1 Clip C	SKL 1 Clip B	SKL14
Parámetro	P_0									
	k_s									
	k									
	F									
	Din.									
	F'									
	k'									
	k_s'									
	P_0'									
	K									
	k_d									
	A. imp									
	C. vert									
	R. tors									
	C. adv									
R. elec										

 Resultado correcto

 Resultado incorrecto

Sin un análisis posterior, y a simple vista se podría decir que el conjunto óptimo de sujeción debería salir de entre las configuraciones 2 y la 4, ya que son las dos únicas que superaron la totalidad de los ensayos que conforman la batería.

También se puede apreciar que las configuraciones 3, 7 y 8 solamente tuvieron problemas en un aspecto puntual, lo que hace suponer que no todos los componentes de estas configuraciones no puedan ser los óptimos. Y de la misma forma el hecho de que las configuraciones 1, 5 y 6 se detuvieran en los primeros ensayos no quiere indicar que sus componentes quedaran invalidados. Por tanto, parece evidente, la necesidad de analizar todos los resultados obtenidos en este capítulo para poder definir los componentes que conformarán la solución óptima.

De todas formas, a partir de esta última tabla, y sin entrar en un mayor grado de análisis, ya se pueden extraer algunas conclusiones definitivas:

- El modelo C0 de placa de asiento (el más blando de los dos) presenta una rigidez insuficiente, por lo cual quedará descartada.
- La sujeción SKL-14 no alcanza el apriete necesario, y por tanto, también será desechada.